PREFACE

Much has been learned about the art and science of managing energy during the past decade. Today, energy management is a seriously applied discipline within the management process of most successful companies.

Initially, in the early 1970's, energy conservation programs were established to alleviate threatened shortages and Canada's dependency on off-shore oil supplies. However, dramatic price increases quickly added a new meaning to the term "energy conservation" — reduce energy costs!

Many industrial, commercial and institutional organizations met the challenge and reduced energy costs by up to 50%. Improved energy use efficiency was achieved by such steps as employee awareness programs, improved maintenance procedures, by simply eliminating waste, as well as by undertaking projects to upgrade or improve facilities and equipment.

In order to obtain additional energy savings at this juncture a greater knowledge and understanding of technical theory and its application is required in addition to energy efficiency equipment itself.

At the request of the Canadian Industry Program for Energy Conservation, the Commercial and Institutional Task Force Program and related trade associations, the Industrial Energy Division of the Department of Energy, Mines and Resources Canada, has prepared a series of energy management and technical manuals.

The purpose of these manuals is to help managers and operating personnel recognize energy management opportunities within their organizations. They provide the practitioner with mathematical equations, general information on proven techniques and technology, together with examples on how to save energy.

For further information concerning the manuals listed below or regarding material used at seminars/workshops including actual case studies, please write to:

Industrial Energy Division
Energy Conservation Branch
Department of Energy, Mines and Resources
580 Booth Street
Ottawa, Ontario
K1A 0E4

Energy Management/Employee Participation
Conducting an Energy Audit
Financial Analysis
Energy Accounting
Waste Heat Recovery
Process Insulation
Lighting
Electrical
Energy Efficient Electric Motors
Combustion
Boiler Plant Systems
Thermal Storage
Steam and Condensate Systems
Heating and Cooling Equipment (Steam and Water)
Heating Ventilating and Air Conditioning
Refrigeration and Heat Pumps
Water and Compressed Air Systems
Fans and Pumps
Compressors and Turbines
Measuring, Metering and Monitoring
Automatic Controls
Materials Handling and On-Site Transportation Equipment
Architectural Considerations
Process Furnaces, Dryers and Kilns.

Minister of Supply and
Services Canada 1985
Cat. No. M91-6/19E
ISBN 0-662-14171-7

TABLE OF CONTENTS

	Page
INTRODUCTION	1
Purpose	1
Contents	1
FUNDAMENTALS	3
Terms and Definitions	3
Objectives of Thermal Storage	4
Using Waste or Surplus Energy	5
Reducing Demand Charges	6
Deferring Equipment Purchases	6
Understanding Sensible and Latent Heat	8
Basic Calculations	8
Calculations for Sensible Heat Storage	8
Calculations for Phase Change Storage	9
Other Considerations	9
Energy for Heating, Refrigeration and Heat Pump Equipment	9
Storage Size Limitations	10
Thermal Load Profiles	10
Optimizing Conventional Systems	11
Energy Audit Methods	11
Summary	12
EQUIPMENT/SYSTEMS	13
Thermal Storage Media	13
Sensible Heat Storage	13
Liquid Media	13
Blending and Thermal Losses in Liquid Media	14
Solid Storage Media	17
Phase Change Storage Media	18
Ponds and Aquifer Storage	19
Typical Thermal Storage Systems	20
Chiller Heating and Cooling Storage	20
Ice Storage	21
Heat Reclaim Using Thermal Storage	23
Controls	24

ENERGY MANAGEMENT OPPORTUNITIES 25

The Correct Approach to Thermal Storage 25

Housekeeping Opportunities 25

Low Cost Opportunities 26

Low Cost Worked Examples 26
1. Use Storage Capacity of Building Structure 26
2. Thermal Storage in Equipment and Products 27
3. Thermal Storage in Piping Systems 27
4. Raise Tank Temperature Settings 29

Retrofit Opportunities 30

Retrofit Worked Examples 30
1. Pressurized Water Systems 30
2. Waste Water Storage 32
3. Identifying Demand Charge Reductions 32
4. Building Addition 33

APPENDICES

A Glossary
B Tables
C Common Conversions
D Worksheets

INTRODUCTION

Thermal storage is the collection of heating or cooling energy available for use at a later time. For example, excess heat generated in a building during the day might be stored for heating at night when the heating load is usually greater. This module will examine the factors influencing the use of thermal storage in Industrial, Commercial and Institutional facilities, and assist owners and operators in the analysis of potential opportunities to conserve energy or reduce energy costs.

Purpose

The purpose of this module is summarized by the following items.

- Identify the principal benefits of thermal storage.
- Discuss potential sources of low cost thermal energy and the techniques and equipment used to store this energy.
- Present basic equations to assist in the preliminary assessment of thermal storage potential.
- Identify general parameters required for successful thermal storage applications.
- Provide, with the aid of worksheets and examples, methods of evaluating thermal storage potential.

Contents

This module is subdivided into the following sections.

- *Fundamentals* describes the principal parameters and opportunities for thermal storage and presents basic equations to assist in sizing equipment.
- *Equipment/Systems* reviews the basic components used in thermal storage systems and introduces a number of typical systems.
- *Energy Management Opportunities* lists a series of opportunities for thermal storage systems. A number of worked examples are presented with sample worksheets to assist in assessing the potential for a given facility.
- *Appendices* include a glossary of terms, conversion factors, tables and worksheets.

FUNDAMENTALS

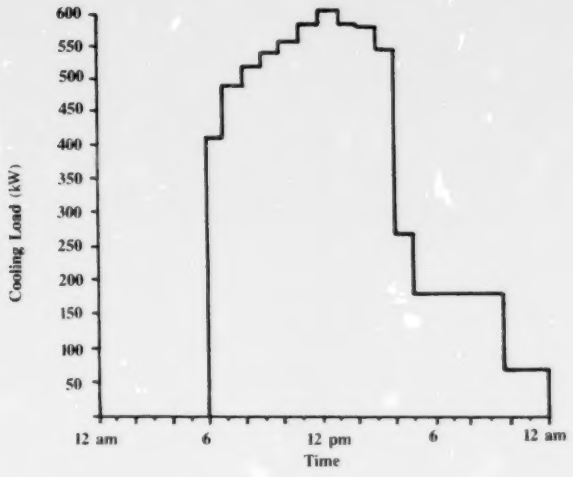
The most familiar application of thermal storage is the domestic hot water tank. Cold water in the tank is heated at a slow rate and then maintained at the desired temperature until required. Hot water is often drawn from the tank at a faster rate than it was generated partially depleting the tank of stored hot water.

- The water in the tank is called the *thermal storage medium*. It is the substance that actually stores or contains the thermal or heat energy. The tank itself does not store thermal energy in any significant amount, it stores only the water.
- When heat is added to the water and the temperature of the water in the tank increases, the thermal storage is being *charged*, and conversely, when hot water is being removed and replaced with cold water, it is being *discharged*.
- *Thermal energy (heat)* is generated by the conversion of another form of energy, such as electricity, into heat. Other common sources of energy that can be converted into thermal energy are natural gas, propane, oil, wood, and coal.
- The amount of hot water required is the *thermal load*, and depends directly on the user's requirements, regardless of whether the water is heated slowly or quickly. Small heaters will heat water at a slower rate than large heaters, even though the total amount of heat used is the same.
- Once the tank is fully charged, only a small amount of energy is required to maintain the temperature of the water. The energy added balances the heat lost through the shell of the tank.
- The tank's *thermal capacity* becomes greater as the size increases and as the temperature of the hot water is raised.

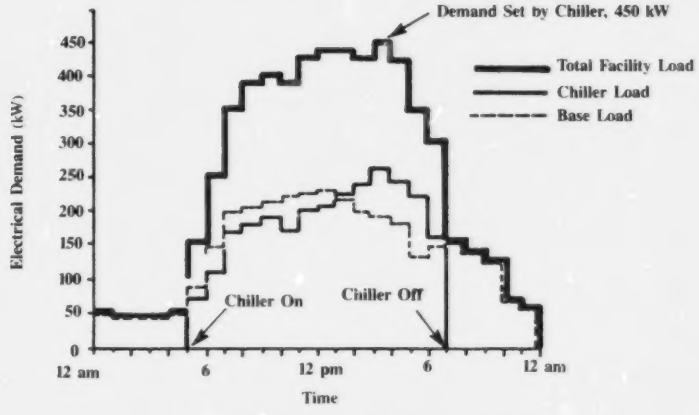
Before reviewing the details of thermal storage systems and operating strategies, the knowledge of a few terms and definitions is useful.

Terms and Definitions

- *Electric Consumption and Demand Charges* – Utilities usually charge for electricity on the basis of *consumption* and *demand*. Consumption is the amount of energy used in a given period and is charged on the basis of dollars per kilowatt hour ($/kWh). Demand is the maximum rate of energy consumption over a short period of time. The demand charge is based on dollars per kilowatt ($/kW), where the kW is the highest demand reached in a given month. For example, if the maximum demand in a one month billing period is 150 kW, and the utility charges $3 per kW, the demand charges for the month will be $450. Demand charges are usually calculated each month based on the highest demand occurring in the month and can be the larger portion of an electricity bill. Refer to Electrical, Module 3.
- *Load Shedding* – Load shedding is a technique whereby, as electrical demand loads approach a predetermined level, some electric equipment is shut down on a priority basis, either manually or automatically, to reduce the facility's peak electrical demand. For additional details refer to Electrical, Module 3.
- *Load Profiles* – A chart or graph, where the load is plotted against time, is a useful tool for reviewing thermal storage potential. Figure 1 is a typical *thermal cooling load profile* showing the cooling requirements at various times of the day. Additional profiles can be prepared to show the requirements for heating, electricity, gas, or other fuels against time. These profiles can correspond to the load of a single system or piece of equipment, or to a number of systems with loads superimposed. Figure 2 shows a facility's electrical base and chiller loads; the sum of the two corresponding to the total load profile. Variations in the profiles are caused by changes to the occupant load, switching of lights and other electrical devices, and the effect of the outside conditions.



Typical Thermal Cooling Load Profile
Figure 1



Electrical Load Profile, Conventional System
Figure 2

Objectives of Thermal Storage

The main objective of thermal storage is to save dollars. These savings can be achieved in several ways.

- Purchased energy "consumption" can be reduced by storing waste or surplus thermal energy available at certain times for use at other times. An example is the storing of "free" solar energy collected during the day for heating at night.
- Purchased electrical energy "demand" can be reduced by storing electrically produced thermal energy during off-peak periods to meet the thermal loads that occur during high demand periods. An example is using an electric chiller to charge a chilled water storage system at night, thereby reducing the electrical demand peaks usually experienced during the day.
- Defer the purchase of additional equipment for heating or cooling and reduce equipment sizing in new facilities. Operate equipment when thermal loads are low to charge thermal storage systems. Withdraw energy from storage to help meet the maximum thermal loads that exceed equipment capacity.

Using Waste or Surplus Energy

Where thermal energy, in any form, is being rejected, consider reclaiming the heat for either immediate or future use. The temperature of the waste energy stream will affect the economic benefit of recovering the heat energy. For example, warm water drained to a sewer may be useful for preheating process make-up water, but be inadequate for space heating.

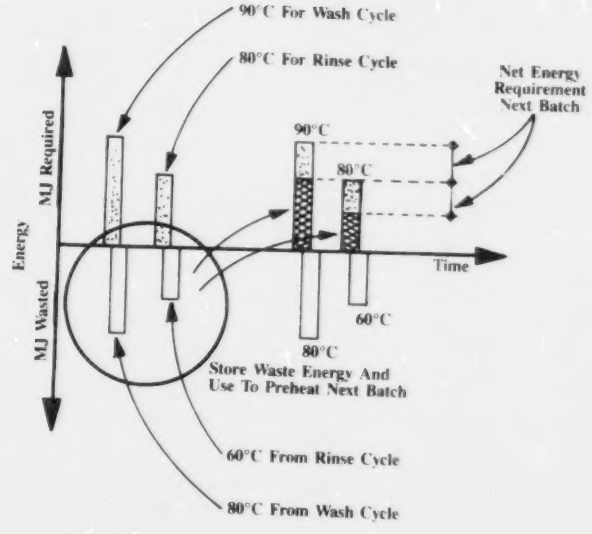
Useful energy is available from many sources.

- Hot or cold water drained to a sewer.
- Hot flue gases.
- Exhaust air streams.
- Hot (or cold) product or waste product.
- Heat collected from solar panels.
- Ground source thermal energy.
- Superheat and condenser heat rejected from refrigeration equipment. See Refrigeration and Heat Pumps, Module 11. Water cooled condensers often provide attractive opportunities to save heating energy dollars.
- Refrigeration (cooling) effect from the evaporator of a heat pump system. A heat pump operating in the heating mode extracts heat at the evaporator. The resulting cooling effect can be stored for process or building cooling.

The waste energy in *continuous* processes can be used directly to heat or cool products or processes. However, in *batch* processes, thermal storage systems are necessary to save the excess or waste thermal energy until it can be used effectively. If necessary, this energy can be upgraded by the use of heat pumps.

An example of this application may occur in a textile plant. Hot water, used in the washing and rinsing process, is drained to the sewer after each cycle (Figure 3). Energy dollars can be saved by providing a separate storage tank to hold the waste hot water from the wash and rinse cycles until it can be re-used directly in the process or for preheating the make-up water for the next cycle. Energy costs are reduced because less energy is purchased to heat the wash and rinse water. This principle applies to many *heat recovery* applications.

Solar heating systems require thermal storage to accumulate "free" solar energy, in the form of heat, until the energy is needed.



Example of Batch Process
Figure 3

Reducing Demand Charges

The primary goal of most thermal storage systems is to lower electrical demand and thus reduce the electrical demand charges. Reductions in demand charges are accomplished by shutting off or limiting electrical input (load shedding) to electrically operated heating or cooling devices during the electrical peaks of a facility. The devices are operated before the peak occurs (e.g., overnight) to charge the thermal storage systems. During the peak demand period the heating and cooling equipment is off, and the thermal loads are met with the heating or cooling energy taken from storage. Control of the use of other electrical equipment should also be considered for demand limiting even though it is not applicable to thermal storage (eg. lighting).

A facility that has an electrical load profile with major peaks in demand is a good candidate for thermal storage. The normal thermal and electrical load profiles should be plotted to assist with the evaluation of reducing electrical demand charges. In Figure 2, the peak electrical demand for the facility occurred when the chiller output reached its maximum in the late afternoon. If the chiller could operate as shown in Figure 4, the electrical peak would be reduced by 125 kW. The chiller thermal load profiles in Figure 5 show the strategy of storing thermal energy during nonoccupied hours to satisfy the thermal loads during occupied hours. The figures also show that the chiller can operate during occupied hours. Operation in this manner can still result in a lower overall facility electrical peak, depending on the actual facility load profiles.

The electrical source that powers the heating or cooling equipment can be shut off, or have power limiters installed, to reduce electrical demand during peak periods. Many types of equipment can be energized and de-energized in accordance with thermal storage operating strategies.

- Building heating and cooling.
- Domestic water heating.
- Process heating and cooling.
- Refrigeration.
- Snow melting.
- Drying.
- Icemaking.

Low demand charges and flat consumption rates are typical in most areas of Canada and are not as supportive to thermal storage when compared to areas of higher cost electricity. Several Canadian utilities are studying the feasibility of various time-of-day rate structures. Under such a system, consumption or demand charges, or both, could vary depending on the time of day. Electric power would be more expensive during the *utility's peak period* and less expensive during the night or on weekends. Should any of these time-of-day schemes be implemented, opportunities for thermal storage will increase. Negotiations with the local utility may result in a lower rate structure for users of off-peak power.

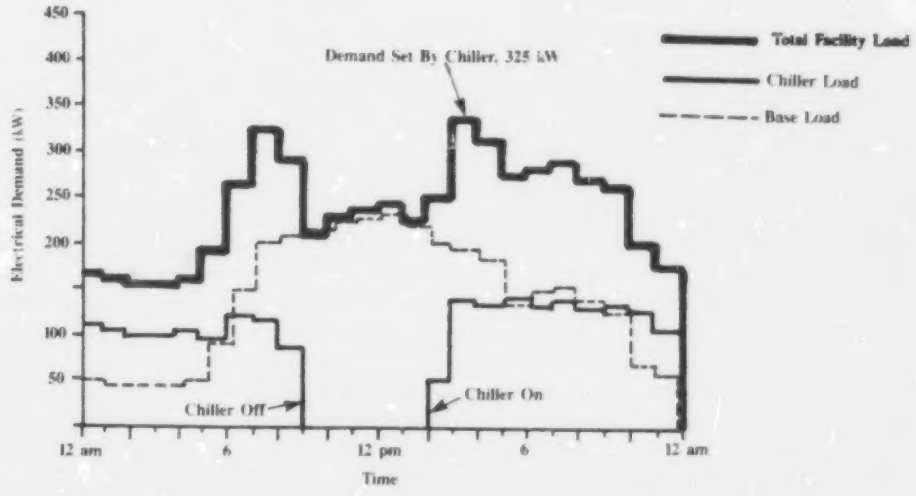
Deferring Equipment Purchases

The capacity of heating and cooling equipment is normally selected to match the "design day" load, when the requirements for heating or cooling are near maximum. These design loads occur only for short periods of time resulting in excess capacity on average days. The difference between the peak and average thermal loads, combined with thermal storage, provides an opportunity to defer equipment purchases in a retrofit application or reduce the equipment size in a new installation.

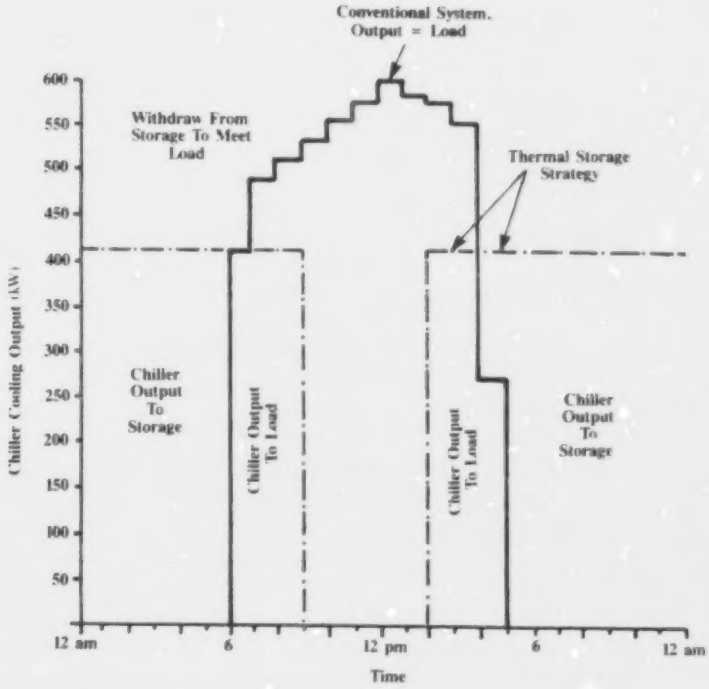
For example, consider a building with an average cooling load of 500 kW and a peak cooling load of 650 kW. The capacity of the existing chiller is 750 kW. A proposed expansion will increase the average cooling load to 700 kW and the peak to 850 kW. The new average load could be satisfied with the existing equipment, but not the peak. A new chiller with a capacity of 100 kW is required using a conventional approach.

Rather than provide a new chiller, a thermal storage system could satisfy the peak cooling load. During off-peak hours, when the thermal load is less than the capacity of the existing chiller, the chiller would operate to maintain the desired building or process conditions, and excess capacity would be used to charge a chilled water storage system. When the cooling load exceeded the chiller capacity, chilled water would be drawn from storage. Benefits include capital savings and reduced operating costs. The reduced operating costs result from limiting peak electrical loads to that required to provide only 750 kW of cooling instead of 850 kW and from having less equipment to maintain. The annual electrical consumption for cooling would increase and be proportional to the new cooling loads.

This technique is also used in new facilities, where the capacity of the thermal equipment is selected closer to the average condition rather than the peak condition.



Revised Chiller Operation
Figure 4



Thermal Load Profile (Chiller Output)
Figure 5

Understanding Sensible and Latent Heat

When thermal energy is added to, or removed from a substance, the temperature of the substance will change or the substance will change *state*.

Thermal energy associated with a change in temperature is called *sensible heat*. The amount of energy is dependent upon the temperature change, the amount of material and the *specific heat* of the material expressed in kJ/(kg·°C).

The thermal energy associated with a change of state (or phase) is called *latent heat*. When the change of state is from gas to liquid (eg., steam to water) the *latent heat of condensation* is removed. The latent heat of condensation is generally dependent on material properties, temperature and pressure. When the change of state is from liquid to solid (eg., water to ice) the *latent heat of fusion* is dissipated. The heat of fusion is dependent on material properties and temperature, and for practical purposes is independent of pressure. Units for both are kJ/kg. In most storage systems, thermal energy is stored in the form of *sensible heat* or *latent heat of fusion*.

Sensible heat storage is accomplished by raising (or lowering) the temperature of the storage medium. A hot water bottle is a simple example. The water, heated to a higher temperature, will store more thermal energy than if heated to a lower temperature.

An ice pack is an example of thermal storage based on a phase change. Heat is removed from the water until freezing occurs. Later, as the ice pack melts, heat is absorbed from the surroundings causing a cooling effect.

Phase change thermal storage systems are more compact than sensible heat storage systems and generally store about 10 times more energy per unit volume. For example, freezing one kilogram of water will store about 334 kJ of cooling in the form of ice at 0°C. Melting the ice will remove the 334 kJ from the surroundings. About 10 kg of water would have to be cooled through 5°C to store the same amount of thermal energy.

Basic Calculations

Calculations are necessary to make a preliminary assessment of thermal storage opportunities in a given facility.

Calculations for Sensible Heat Storage

The amount of heat that can be stored in a liquid or solid by raising the temperature is given by the following equation.

$$E = \frac{M \times cp \times DT}{1000}$$

Where, E = Thermal energy stored, (MJ)

M = Mass of storage medium, (kg)

cp = Specific heat at the mean temperature, [kJ/(kg·°C)]

DT = Temperature change of the storage medium, (°C)

1000 = Conversion of KJ to MJ

The volume of storage medium required to hold a given amount of thermal energy can be calculated.

$$V = \frac{M}{d}$$

Where, V = Volume, (m^3)

d = Density, (kg/m^3)

Volume can also be expressed by the following equation.

$$V = \frac{E}{d \times cp \times DT}$$

The specific heat and density of a number of common substances are listed in Table 1.

The volume of a storage medium required for a given amount of thermal storage can also be calculated using data from Table 2.

The potential storage effect for any building is best determined by experimentation. As a guide, the amount of energy that can be stored in a typical industrial space going through a 3°C temperature change is about 0.370 MJ/m^2. For a typical office space undergoing a 2°C temperature change, about 0.250 MJ/m^2 can be stored.

The equation $E = M \times cp \times DT$ for sensible heat storage can be rewritten.

$E = 0.370 \times A$ (typical industrial space), or

$= 0.250 \times A$ (typical office space)

Where, E = Thermal energy stored, (kJ)

A = Area of building or floor, (m^2)

Note that only the surface layer of a concrete slab will actively exchange or store heat when operating on a daily cycle. Time cycles are too short to get more storage effect even with thick slabs.

Calculations for Phase Change Storage

When considering phase change materials for storing energy, the volume of storage media required can be approximated from Table 2 or calculated.

$E = M \times$ (Latent heat of fusion)

or, $$M = \frac{E}{\text{Latent heat of fusion}}$$

Where, E = Thermal energy stored, (kJ)

M = Mass of phase change medium, (kg)

Latent heat of fusion = amount of heat required to melt or freeze the substance, (kJ/kg)

Other Considerations

The assessment of thermal storage in a facility requires an appreciation of other criteria.

- Energy for heating, refrigeration and heat pump equipment.
- Storage size limitations.
- Thermal load profiles.
- Optimizing conventional systems.

Energy for Heating, Refrigeration and Heat Pump Equipment

Electricity can be converted to thermal energy by electric resistance elements or by mechanical means. In resistance heating systems, each kWh of electricity is converted to one kWh (3.60 MJ) of heat, and conversion efficiency is 100 per cent. Typical examples are electric baseboard heaters, electric water heaters and slab heating systems.

Where refrigeration and/or heat pump systems are used to produce heating and/or cooling, the conversion efficiency or Coefficient of Performance (COP) is greater than 100 per cent. However, a waste heat stream is required to achieve this result. (Refer to Refrigeration and Heat Pumps, Module 11.) In typical systems the COP is approximately 3.5 where each kWh of electrical input to the equipment produces approximately 3.5 kWh of heating or

cooling output. A refrigeration system producing heating or cooling at a rate of 350 kW will have a power requirement of 100 kW, which is calculated by dividing 350 by the COP value of 3.5. This fact is important when storage systems, whose principal goal is demand reduction, are being considered. If the waste heat stream has a high heat content and heating is required elsewhere, heat exchangers can be used to transfer the heat, thereby increasing the system COP and reducing energy dollars.

When existing systems are being considered for conversion to thermal storage arrangements, actual equipment COPs should be obtained from the manufacturers. When this information is not available, heat pump and refrigeration system energy requirements can be approximated using a COP of 3.5. Systems with a COP in the range of 10 to 20 exist, but are not common.

Refrigeration system energy consumption per unit of capacity increases as the cold side (evaporator) temperature is reduced and as the hot side (condenser) temperature increases. Producing ice at 0°C, therefore, requires more energy than producing chilled water at 4°C. Conversely, it takes more refrigeration power to produce hot water at 50°C than at 35°C. As the results usually vary less than 3 per cent, when the COP is near 3.5, these effects are ignored in this module.

Storage Size Limitations

Thermal storage systems have been considered in a range of capacities from only a few hours to long term storage. An example of long term storage is the collection of solar energy available during the summer, to be used for winter heating. A number of practical limitations restrict most thermal storage schemes from storage cycles of a few hours to a maximum of a few days. The principal limitations of thermal storage are space requirements and capital costs.

For example, consider a building or process requiring 1000 kW of chilling capacity for 900 hours of full load operation. The minimum annual cooling energy that must be stored is 900 x 1000 = 900 000 kWh. If ice is used as the storage medium, Table 2 indicates that about 3 litres of ice (about 3 kg) is required to store one megajoule of cooling.

$$\text{Ice required} = 3 \text{ L/MJ} \times 900\,000 \text{ kWh} \times 3.6 \text{ MJ/kWh}$$

$$= 9\,720\,000 \text{ litres}$$

$$\text{or} = \frac{9.72 \times 10^6 \text{ L}}{1000 \text{ L/m}^3}$$

$$= 9720 \text{ m}^3$$

Assuming "perfect tanks" with no *standby heat losses* and no "safety margin", a tank two metres deep would cover an area the size of a football field. A water storage system would be at least ten times larger. Costs for such large systems are prohibitive. Because of energy losses, the inability to use all the thermal energy stored, and the necessity to provide some margin of safety, the minimum storage system size may be 25 per cent larger than the volumes estimated from Table 2.

Thermal Load Profiles

When thermal loads fluctuate, a potential exists for storing thermal energy to meet later thermal requirements.

Many buildings and facilities have load profiles conducive to thermal storage. Office buildings with low cooling requirements overnight and during the morning, and high cooling demands in the late afternoon, show the optimum profile for thermal storage. Often, the air-conditioning systems of these buildings are shut off at night. The combination of daytime part loads and nighttime shutdown provides the equivalent of 15 to 20 hours per day in which a chilled water storage system could be recharged to meet the demand period.

Hotels, hospitals and industrial plants that operate "around the clock" are less likely candidates for full building storage systems as the load profile is flatter. Less time is available for recharging the storage between the long peak cooling periods. However, these facilities are often suited to partial thermal storage and peak shaving systems. For example, the base thermal load may be provided by a chiller, with peaks reduced using a combination of chiller and storage. In this case, the chiller would contribute to the electrical demand, but by a lower amount. The return on capital investment can be maximized with careful sizing and using the compressor heat for preheating domestic or process hot water.

Weather affects the thermal load profile of a building and is also a major factor in determining the feasibility of thermal storage. For cooling storage, the summer weather profile should include a limited number of peak days and, if possible, large temperature variations during a given 24 hour period. Where storage for heating is being considered, a minimum of 2200 *degree days below 18°C* are usually required to make the project viable. Most Canadian locations meet these general criteria.

Optimizing Conventional Systems

Existing heating and cooling systems should be upgraded and properly maintained to reduce energy inefficiencies before implementing any active storage system. When reviewing conventional systems, be alert to the possibility of heat reclaim to recover energy from exhaust streams such as boiler flue gases.

Consider changing from batch to continuous processes so that direct heat reclaim, without intermediate thermal storage, can be used. This results in more effective heat reclaim, no standby losses, and reduced capital expenditures.

Energy Audit Methods

A number of Energy Management Opportunities using the concepts of thermal storage exist in Industrial, Commercial and Institutional facilities and many are recognizable during a *walk through* audit of a facility. This audit is usually more meaningful if a "fresh pair of eyes', generally familiar with energy management, is involved. However, such an audit would likely generate a list of opportunities related to the condition and operation of existing, conventional heating and cooling systems. A detailed analysis is required to establish whether or not real opportunities exist for thermal storage systems.

The following questions might be asked, and require analysis as part of any assessment of thermal storage.

- What are the electrical demand and consumption charges?
- Are there peaks in the electrical demand profile?
- Is the demand charge portion of the electrical charges the major portion of the electric bill?
- Is electric heating or cooling equipment operating at the time of the peak, and can this equipment be shut off?
- Is thermal energy being wasted?
- Do some processes or products require cooling while others require heating at different times?

This information is used to perform a *diagnostic audit* to mathematically determine existing operating conditions, potential energy reductions and cost savings. Once capital costs are determined, simple payback calculations can establish the financial viability of the opportunity.

The implementation of Energy Management Opportunities can be divided into three categories.

- *Housekeeping*, refers to an energy management action that is *repeated on a regular basis and never less than once a year.* Repair of leaks, and preventive maintenance programs to prevent deterioration in existing systems are examples.
- *Low cost*, refers to an energy management action that is *done once and for which the cost is not considered great.* Examples of low cost items are revising operating schedules, using existing storage tanks for thermal storage, modifying controls to permit preheating or precooling followed by load shedding, and installing tanks for reclaiming waste hot water.
- *Retrofit*, refers to an energy management action that is *done once and for which the cost is significant.* Examples of retrofit items include the installation of ice makers and storage bins for storage of cooling energy, or hot/chilled water storage systems working with a heat reclaim chiller.

It must be noted that the division between low cost and retrofit is normally a function of the size, type, and financial policy of the organization.

Summary

Substantial energy and dollar savings can be realized by taking advantage of thermal storage when the following techniques can be implemented.

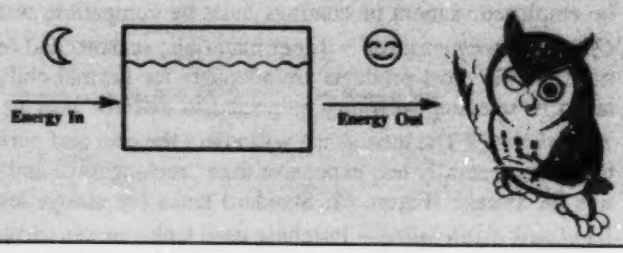
- *Use surplus heat or waste energy* by storing thermal energy which is not immediately useful. Later, when thermal energy for heating or cooling is required, draw the heat energy out of storage, thereby reducing the facility's energy requirements.
- *Reduce electrical demand charges* by operating selected electrical equipment at off peak times to charge a thermal storage system. Thermal energy is then withdrawn from storage during peak electrical periods so that peak electrical demand can be reduced.
- *Avoid heating or cooling equipment purchases* by drawing from storage the extra heating or cooling energy required to satisfy the peak building or process thermal loads. The existing heating or cooling plant is used to charge storage during off-peak times.

Several parameters influence the viability of any thermal storage proposal.

- Facility thermal loads.
- Thermal and electrical load profiles.
- Availability of waste or excess thermal energy.
- Electrical costs and rate structures.
- Type of thermal generating equipment.
- Building type and occupancy.

For energy consumers contemplating some of the more complex schemes discussed further in this module, thermal storage opportunities should be evaluated by a specialist.

EQUIPMENT SYSTEMS



Common components of thermal storage systems, such as pumps, piping, control valves and chillers, are discussed in other modules of this series. Storage media, tanks and equipment specific to thermal storage systems are briefly described in this module. A limited number of systems typical of larger thermal storage facilities are also presented.

Thermal Storage Media

The basic theory of sensible and latent heat of fusion types of thermal storage media was reviewed in Fundamentals. Tables 1 and 2 list the key characteristics of construction materials and storage media in use today.

Selection of media type is dependent on a number of features.

- *Volume* – How much space will be required for the storage medium?
- *Temperature* – In what temperature range will the system operate? Will it be used for heating, cooling or both?
- *Life* – Will the storage medium effectiveness diminish through repeated use or contamination?
- *Temperature degradation* – Is the storage medium prone to degradation of the stored energy because of the properties of the material?

Water, which can be used for both heating and cooling, is the most practical sensible heat storage media because of low cost, high thermal storage capacity, nontoxicity, long life and ease of handling.

Water, when used as a phase change material, is ideal for the same reasons. Ice systems use latent heat as the principal thermal storage technique, with sensible heat storage in the solid and liquid phases accounting for only a fraction of the total capacity.

Other phase change materials are available, but toxicity, cost, heat storage capacity and media degradation must be carefully examined. For example, Glauber's salt will deteriorate with age and lose the ability to store heat.

Solid storage media using sensible heat storage are common. A simple example is the preheating or precooling of a building or product by using its thermal mass to store sensible heat for a short period of time in order to shut off electrical equipment and reduce the electrical demand. Another example is using the floor slab of a greenhouse or solarium for storing solar heat during the day for use at night.

Sensible Heat Storage

Liquid and solid media can be used in sensible heat storage systems.

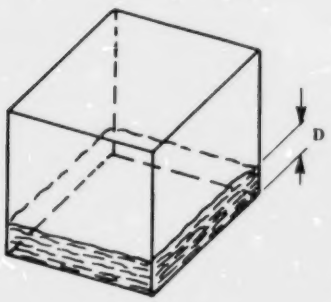
Liquid Media

Liquid media used for sensible heat storage must be contained in tanks. A number of options are available, and, provided that proper care is taken, conventional tank construction may be used. The most common materials are steel, concrete and fiberglass.

Tank selection and design is based on several factors.

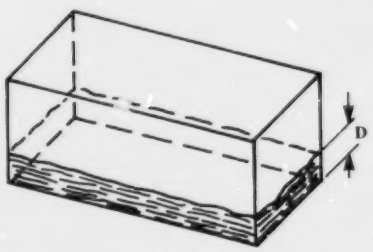
- *Location and size* – Is the tank system to be located on grade, below grade, in a basement or parking garage, or on the top floor of a building? Size and pumping requirements are major factors in these decisions.
- *Existing or new facilities* – If the tanks are to be installed in existing facilities, can tanks be prefabricated or must they be assembled on-site?
- *Thermal expansion* – Allowances must be made for the expansion and contraction of the storage medium and the tank over the range of operating temperatures.
- *Piping connections* – If there are a large number of piping connections to be made below the fluid level, how difficult is it to make and maintain leakproof connections?
- *Corrosion* – Steel tanks and other components corrode or deteriorate if proper care is not taken. Liners, coatings, chemical treatment or other means of corrosion protection must be maintained.

- *Sealing against leaks* – Some materials such as concrete are porous and suitable methods of sealing must be employed. Liners or coatings must be compatible with other materials in the system.
- *Operating temperatures* – Liner materials, sealants and other components have certain temperature limitations. While most products are adequate for normal chilled and heating water applications, care must be taken in selecting materials subjected to extreme heat or cold.
- *Tank shape* – The tank shape will affect the cost and performance of a thermal storage system. "Cubical" tanks are generally less expensive than "rectangular" tanks, but taller rectangular tanks may be more effective for storage (Figure 6). Standard tanks are always less expensive than custom designed ones.
- *Used tank availability* — Purchase used tanks, or use surplus in-house tanks. Tanks must be cleaned to avoid contamination of the thermal storage medium.



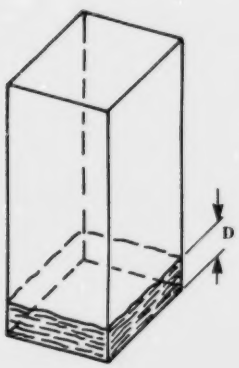
- Lowest Cost
- Lowest Standby Losses
- Acceptable Unusable Volume

(A)



- Cost Similar To (B)
- Highest Standby Losses
- Highest Unusable Volume

(C)



- Cost Similar To (C)
- Standby Losses Higher Than (A)
- Lowest Unusable Volume

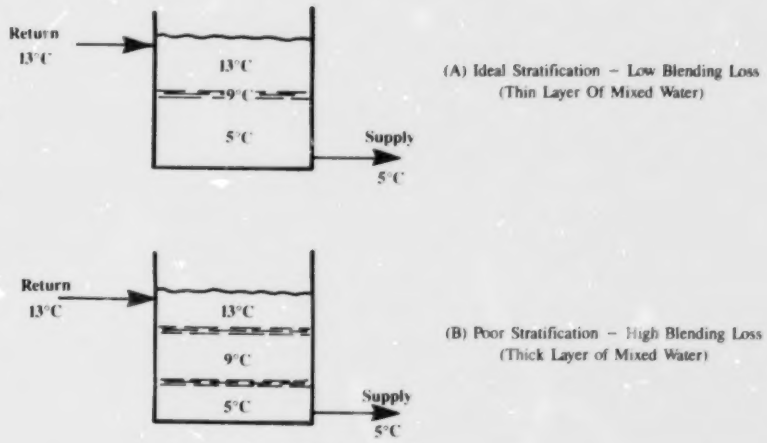
(B)

Note: Unusable depth (D) is equal in all tanks

Tank Shapes
Figure 6

Blending and Thermal Losses in Liquid Media

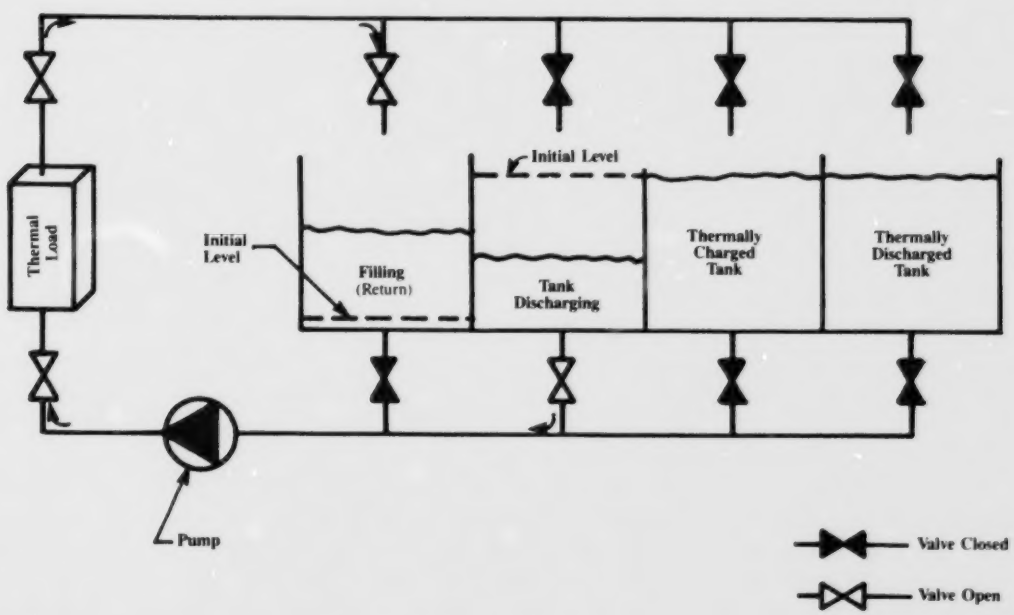
The thermal storage capacity of a tank can be improved by incorporating features which prevent mixing of the return flow with the stored fluid. If mixing occurs, the resultant storage media temperature may not be usable for the intended purpose. For example, consider a chilled water storage tank filled with equal parts of 5°C supply water and 13°C return water from the cooling system (Figure 7). If the supply and return water were allowed to mix, the resultant 9°C water would probably be too high for air-conditioning purposes.



Stratification In Thermal Storage Tanks
Figure 7

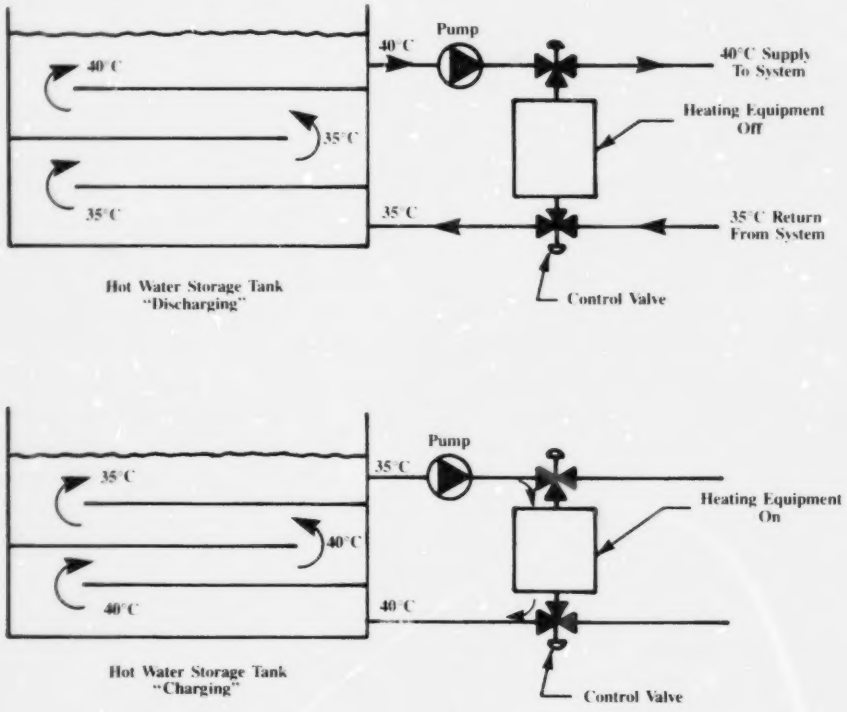
A variety of techniques can be used to prevent blending.

Multiple tanks are used to physically separate the supply water from the return water (Figure 8). After the water is pumped out of storage and used in the heat transfer application, it is returned to an empty tank to prevent mixing. This common method is simple and dependable, but losses occur because some water must be left at the bottom of each tank to ensure that the pump suction is submerged. This volume of water can be reduced by providing taller and thinner tanks, or sumps at the bottom of each tank. The total volume contained within the tanks must also increase accordingly to allow for one empty tank.



Multiple Tank Concept
(Storage Being Discharged)
Figure 8

Fixed baffles within a tank direct the water flow through a maze of channels (Figure 9). Interfaces between supply and return water are minimized as the channels make the tank behave in a manner similar to a long pipe. This figure also shows how a heating water storage tank with baffles is charged and discharged. In the discharging mode, 35°C water returning from the system enters the bottom of the tank and displaces the 40°C water that is pumped into the system. In the charging mode, the 35°C water is taken from the top of the tank, passed through a heating device to increase the water temperature to the required 40°C and returned to the tank. This operation continues until the tank is totally charged with 40°C water.

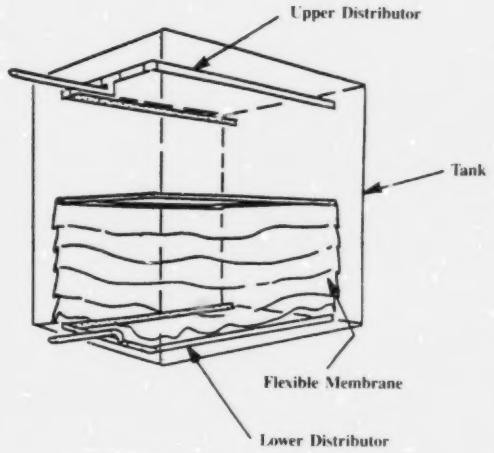


Storage Tank With Baffles To Separate Supply And Return Flows
Figure 9

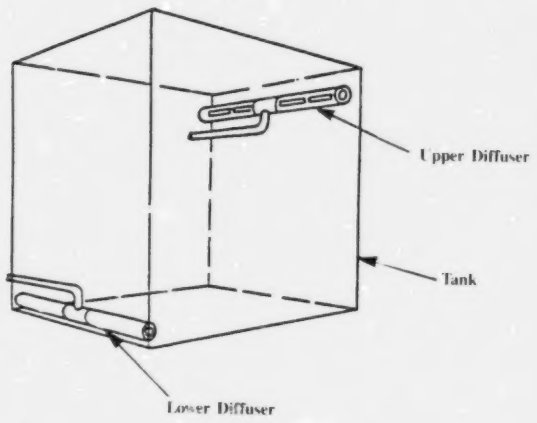
A *flexible membrane* within a tank separates the supply water from the return water. The membrane moves up or down in the tank as the proportion of return water changes (Figure 10). Heat loss is minimal across the membrane and mixing is eliminated. Care must be taken to ensure that the membrane does not collapse into the pump suction, tearing the membrane and perhaps damaging the pump. To prevent this occurrence, some water must be left in the bottom of the tank, wasting a portion of the stored energy.

Uniform inlet and outlet distribution manifolds (Figure 11), located near the tank bottom and top provide stratification within the storage media. Such stratification is more effective in hot rather than chilled water storage because of a greater temperature difference between supply and return water.

Standby heat losses or heat gains reduce the amount of energy in storage. Tank heat loss is dependent on the temperature difference between the contents of the tank and the ambient temperature, insulating value of the tank walls, and time. Insulation is required on steel and fiberglass tanks to control the heat loss. Concrete tanks have lower overall heat transmission coefficients and may not require insulation. An analysis to determine the economical thickness of insulation is required in each case. Refer to Process Insulation, Module 1.



Stratified Storage Tank With Flexible Membrane
Figure 10



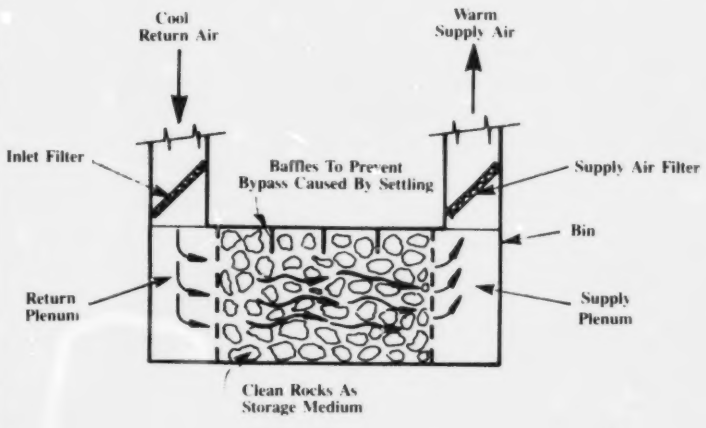
Stratified Storage Tank With Distribution Manifolds
Figure 11

Solid Storage Media

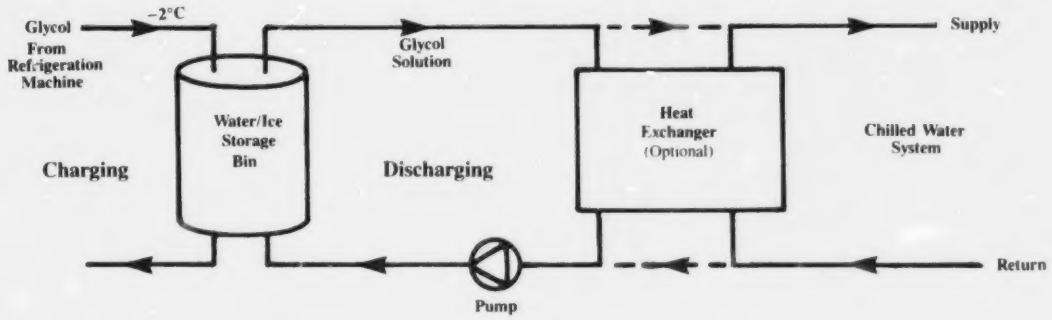
Rock beds and building structures are typical solid storage media.

Rock beds consist of large bins of clean gravel through which a heat transfer media, such as hot air from a solar heating system, would circulate, to charge the bed. Cooler building return air would circulate through the bed to take thermal energy out of storage for space heating (Figure 12).

Building structures effectively store thermal energy. Preheating or precooling a space "soaks" thermal energy into floors, walls, ceiling and other building components. During an electrical peak when equipment is shut down, or a thermal peak when equipment capacity is inadequate, the stored energy returns to the space. Building temperature is allowed to fluctuate during the charging and discharging cycle to save energy. This technique is referred to as *temperature float*. A "float" limited to 2°C in an office or commercial environment, and approximately 3°C in an industrial environment, minimizes possible complaints from the occupants. Preheating or precooling a structure may allow equipment of smaller thermal capacity to be selected to meet the system capacity requirements. This strategy reduces electrical demand and is common in theatres where peak loads normally occur for relatively short periods of time.



Rock Bed Thermal Storage (Discharging)
Figure 12



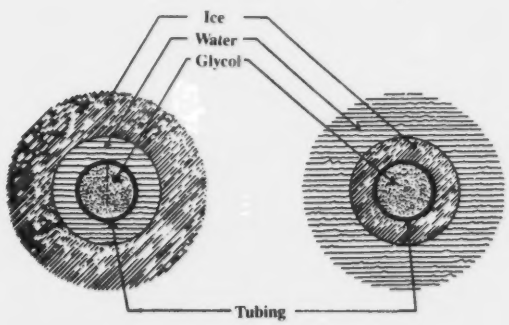
Solid Ice System
Figure 13

Phase Change Storage Media

In the majority of phase change systems, water is used as the storage medium. These systems are designed in two basic forms.

- *Solid ice systems* – A water tank, referred to as a bin, contains a series of coils through which −2°C glycol from a refrigeration machine is circulated (Figure 13). Solid ice builds around the coils (Figure 14). A second glycol loop transfers low temperature glycol to a heat exchanger (optional), where the chilled water is cooled. In some systems the intermediate glycol loop is not used and the water from the chilled water system is taken from, and returned, to the ice storage tank.
- *Flake ice systems* – Ice is made in thin sheets which are broken up and stored in a bin (Figure 15) . The bin is filled with ice flakes or chips during each bin-charging cycle. Ice is removed by an auger and deposited into a smaller bin which contains a coil that is part of the chilled water system. Water, circulating through the coil, is cooled.

Ice systems are popular in retrofit applications where space may be limited since they can store approximately 10 times more cooling energy per cubic foot than chilled water.



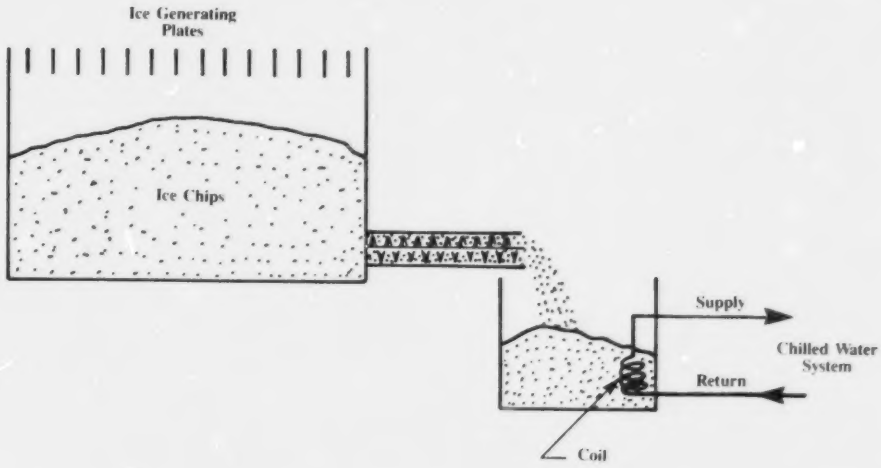
Discharge Mode
(Ice Melting)

Temperature Of Glycol Entering Higher Than Temperature Of Glycol Leaving

Charge Mode
(Ice Forming)

Temperature Of Glycol Entering Lower Than Temperature Leaving

Cross Section Through Icemaking Coils In Ice Storage System
Figure 14



Flake Ice System
Figure 15

The following items are critical to an ice storage system design.

- *Standby losses* – Phase-change media systems have higher standby losses than sensible heat storage systems because of the higher temperature differences between the storage medium and ambient conditions. Care in the application of vapor barriers and insulation is essential to prevent condensation damage.
- *Thermal expansion* – Allowances for expansion and contraction of the storage media and equipment connections to the tank must be made to prevent equipment damage and spillage.
- *Agitators* – Improved heat transfer rates and higher density ice are obtained when the solution surrounding the coils is subjected to mild agitation. An air "bubbler" is the most common method of providing agitation.
- *Refrigeration system power requirements* – Mechanical refrigeration systems are less efficient at generating the low temperatures required for ice making than for making chilled water and therefore consume more electrical energy. However, more cooling per unit volume is provided.

Ponds and Aquifer Storage

Sensible cooling storage can be added to existing facilities by creating a small pond or lake on the site. In some installations this can be done as part of property landscaping. Cooling takes place by surface evaporation and the rate of cooling can be increased with a water spray or fountain. Ponds can be used as an outside thermal storage system or as a means of rejecting surplus heat from refrigeration or process equipment.

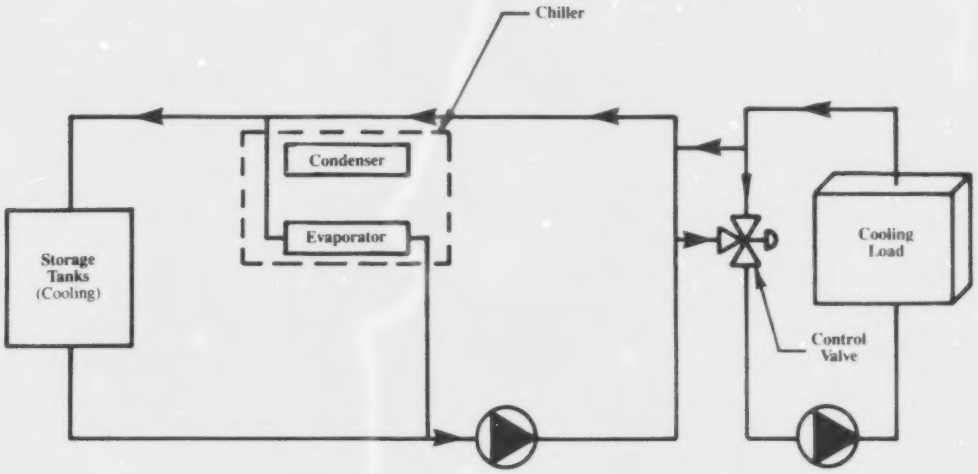
Wells have been drilled to transport water to underground aquifers (underground areas of water bearing rock, sand or gravel). Well spacing, depth and size are functions of the aquifer. Special permits are required from provincial environmental authorities to drill wells for this purpose. Buried piping systems have also been used to extract energy from the ground (usually cooling). While neither of these methods is common, a small number of sites have performed successfully.

Typical Thermal Storage Systems

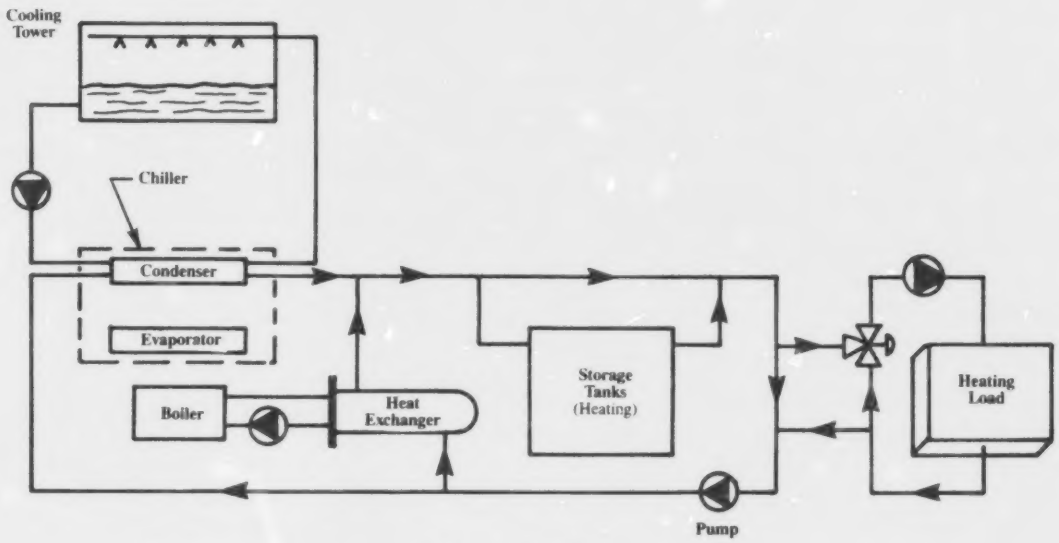
Each thermal storage project is unique because of different load profiles, climate, energy costs and financial considerations. However, generic models can be presented to identify some of the main characteristics. The following sections briefly describe basic storage systems.

Chiller Heating and Cooling Storage

The primary purpose of the scheme illustrated in Figure 16 is to reduce demand charges for a chiller operation. A secondary benefit is the displacement of the conventional heating load to the chiller. The operation of electrical resistance heating is usually uneconomical as compared to gas and oil heating. However, a chiller operating with a minimum COP of 3 can provide heat more economically than gas. When combined with thermal storage, this system charges the heating and cooling storage off-peak to reduce demand charges. An office/commercial complex system can be used to explain the technique.



(A) Cooling Operation



(B) Heating Operation

Heating And Cooling Storage System
Figure 16

Cooling operation – During periods requiring cooling, chilled water is drawn from storage, pumped to the load (coils, process equipment, etc.) through a secondary circuit and returned to an empty tank. Once a tank is emptied of chilled water, it serves as the next return tank.

The chiller, piped in parallel with the storage tanks, can function in one of two ways. First, when full storage capacity is provided, the chiller can be shut off during the peak electrical demand period to reduce the electrical peak of the facility. However, full storage may be impractical. Second, with partial storage, the chiller operates at reduced load. The building electrical peak is reduced, but to a lesser degree than if the full cooling load was provided from storage.

The chiller plant is operated during off peak periods to recharge the chilled water storage. Care must be taken to avoid establishing new electrical peaks during the recharging process.

Heating operation – During periods requiring simultaneous heating and cooling, the cooling is provided by the chiller evaporator as previously discussed.

During low electrical demand periods the chiller, operating as a heat pump, simultaneously recharges the cooling and heating tanks. The tanks are emptied and filled on an alternate basis as each is fully charged.

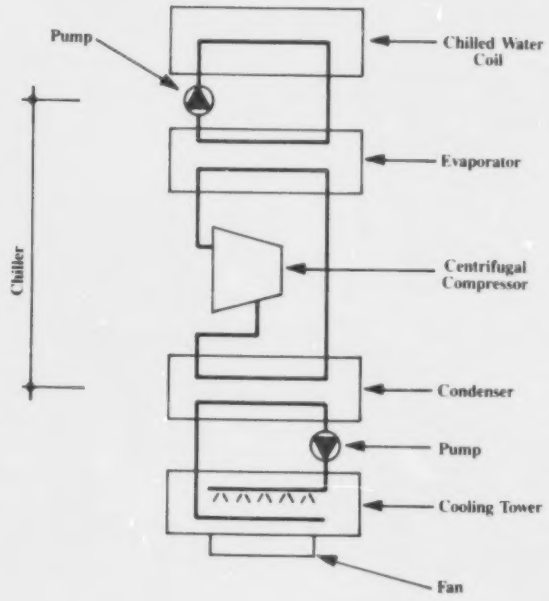
If heating is required during the hot water tank recharging, the load can be provided from storage, the condenser, or the boilers, depending on the charged condition of the storage and the selected operating strategy.

During high electrical demand periods thermal energy can be withdrawn from the tanks as required.

Benefits are obtained by off-peak operation of the chiller or heat pump to meet the cooling and heating requirements and by taking advantage of the COP. "Free" cooling using outdoor air may not be economical under these circumstances, and reduced sizes of the outdoor air ductwork and fans could lower the capital costs of new construction.

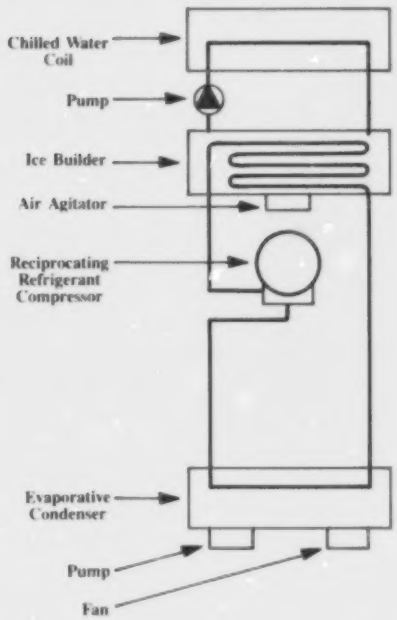
Ice Storage

Figure 1 shows a typical thermal cooling load profile for a commercial building. The electrical load profile would resemble Figure 2 if this load were satisfied with a conventional chiller system (Figure 17). For this design, the chiller electrical load would peak in the late afternoon at the same time as the cooling load.

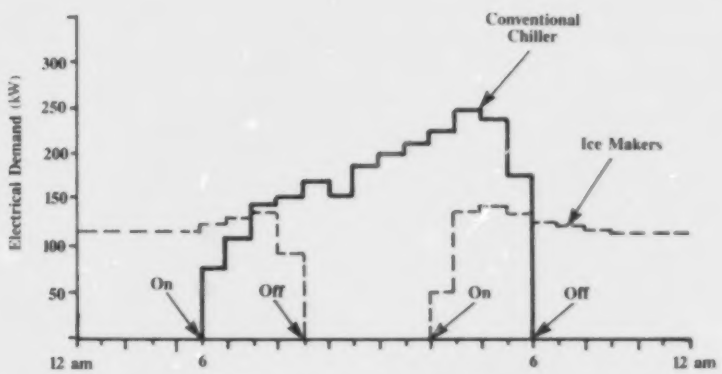


Conventional Chiller System
Figure 17

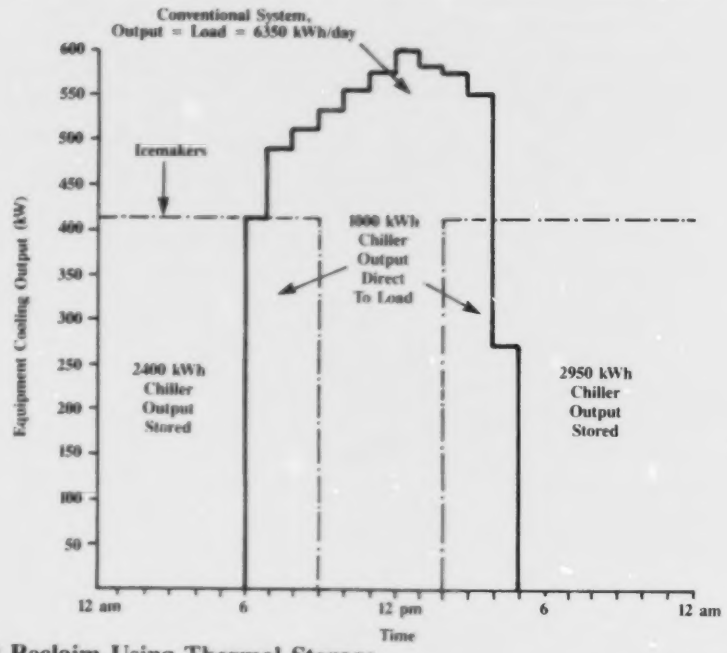
A full storage ice system (Figure 18) can be designed to meet the full cooling load requirements during the facility's peak hours, to reduce electrical demand. Ice production occurs at other than peak hours, such as on weekends and during early morning periods when the thermal and other electrical loads are lower. With the operating strategy represented by Figures 19 and 20, the chiller or ice maker is off during the electrical peak period. The rejected heat from the refrigeration equipment could be used for water heating creating an additional benefit.



Ice Storage System
Figure 18



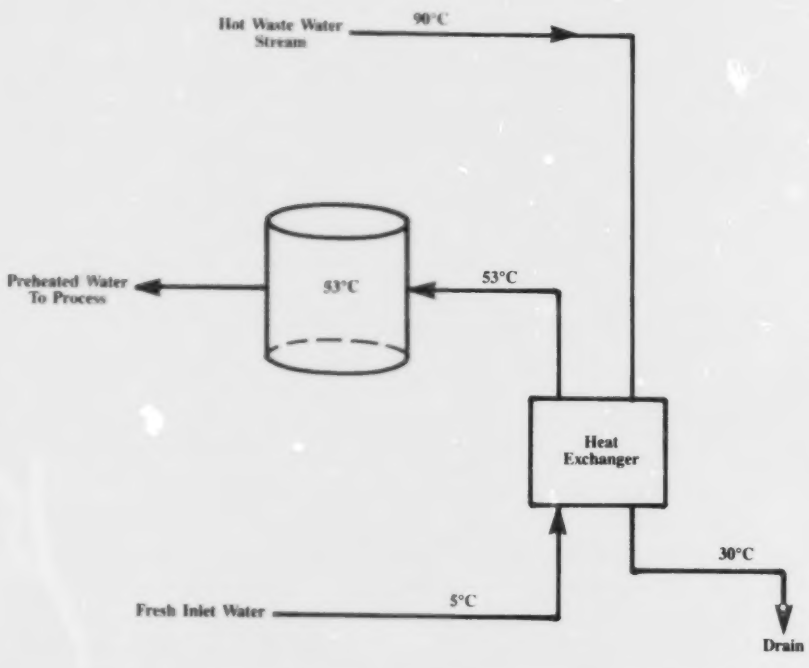
Electrical Load Profiles For Ice Storage Example
Figure 19



Thermal Storage Strategy For Ice Storage Example
Figure 20

Heat Reclaim Using Thermal Storage

A thermal storage system may act as a holding tank which permits matching make-up and waste flows to process requirements (Figure 21). While the storage of dirty or contaminated waste water is often impractical, waste water can often preheat clean make-up water by the use of a heat exchanger. The preheated water is then stored until needed. Better opportunities exist if large volumes of "high quality" heat is available as a waste source. In these cases more energy can be transferred to usefu' purposes because the system COP is increased. Direct use of waste heat for preheating is more efficient than providing a storage cycle. This method is possible only if make-up heating and waste heat discharge occur simultaneously.



Waste Water Storage
Figure 21

Controls

Control flexibility is the key to optimizing building thermal storage systems because exact operating modes and schedules vary continuously and are difficult to accurately predict. A system designed with manual controls, or one which uses state of the art computerized controls can be equally effective, provided the system operation can be readily adjusted to meet the actual site conditions.

Monitoring of thermal storage system operation is required to track system performance and to identify operating problems or potential areas for future improvements. Small systems can be monitored with standard meters, gauges and manual entry logs. Electronic instrumentation and control systems with automatic data logging, trend analysis and other features are generally used in larger systems. For additional control information see Measuring, Metering, and Monitoring, Module 15, and Automatic Controls, Module 16.

ENERGY MANAGEMENT OPPORTUNITIES

Energy Management Opportunities is a term that represents all the ways that energy can be used wisely to save money. A number of typical Energy Management Opportunities subdivided into Housekeeping, Low Cost, and Retrofit categories are outlined in this section. This is not a complete listing of thermal storage opportunities. However, it is intended to provide ideas for management, operating and maintenance personnel to allow them to identify opportunities that are applicable to a particular facility.

The Correct Approach to Thermal Storage

A facility owner or operator should implement conventional energy management opportunities as outlined in the other modules of this series before considering thermal storage techniques. Reducing energy waste and optimizing existing systems is generally more cost effective than providing a thermal storage system. If the facility then appears to have potential for thermal storage, further analysis can be performed to quantify potential savings.

The initial task in the evaluation of thermal storage Energy Management Opportunities usually begins with recording building electrical demand patterns through several typical operating periods. These records can be examined to identify loads which might be shifted to off-peak periods, and equipment operations which can be rescheduled to remove unnecessary peak electrical demands. Worksheet 19-1 is used to assess the potential for demand charge reductions.

Housekeeping Opportunities

Implemented housekeeping opportunities are energy management actions that are *done on a regular basis and never less than once per year.* The following are typical Energy Management Opportunities in this category.

1. Isolate storage tanks if they are not charging or discharging. Improperly isolated tanks decrease storage capacity caused by unnecessary mixing and impose unnecessary loads on the thermal equipment.
2. Repair leaks in storage tanks to avoid storage capacity losses and reduce make-up water and water treatment costs. Inadequate storage may require emergency start-up of equipment and cause a new electrical demand peak. Leaks may also cause water damage.
3. Check antifreeze (glycol) concentration in ice systems. An excessive concentration reduces heat transfer effectiveness and increases the pump power. An inadequate concentration may cause freezing and equipment damage.
4. Keep storage media clean. Ensure that strainers and filters are cleaned regularly to prevent increased pump and fan power. Ensure proper water treatment in systems to control the growth of algae. Keep rock bed filters clean to prevent dirt and lint from clogging the media and increasing fan power.
5. Review data from system operation and the related energy bills. Adjust operating strategies to optimize the system based on actual experience rather than the design projections.
6. Check for proper operation of all control components, particularly primary temperature sensing elements. Improper operation may cause equipment damage, lower system efficiency and reduced storage capacity.
7. Maintain all mechanical equipment according to the manufacturer's instructions.
8. Repair/replace damaged insulation.

Low Cost Opportunities

Implemented low cost opportunities are energy management actions that are *done once and for which the cost is not considered great*. The following are typical Energy Management Opportunities in this category.

1. Use the thermal storage capacity of a building to store heating or cooling energy to reduce electrical demand during peak periods.
2. Use the thermal storage capabilities of process equipment to reduce the operation of heating equipment during plant warm-up periods.
3. Precool chilled water loops before periods of electrical peak loads, so that chiller demand can be reduced by shutting off the chiller or limiting the load.
4. Raise domestic hot water tank temperature. Use the greater thermal capacity to keep the heating equipment off during peak electrical demand periods. Maintain supply water at the customary temperature by installing a fail-safe, three-way valve to blend heated and cold make-up water.
5. Use surplus equipment (tanks, pumps, etc.) to lower capital investment.

Low Cost Worked Examples

1. Use Storage Capacity of Building Structure

The thermal storage capacity of a building structure can be used to reduce both the electrical demand peaks of a facility and the requirement for new heating and cooling equipment. The following procedures would be necessary when storing cooling energy in a 5000 m^2 air-conditioned industrial building.

- Operate the space at 1.5°C below normal for one hour before electrical load peak times to allow cooling energy to "soak" into the building fabric.
- As electrical loads approach the peak, reduce the chiller power draw with a load limiter switch.
- Allow the space temperature to rise 1.5°C above normal during the peak electrical demand period.

The thermal capacity that can be put into storage through a 3°C temperature float can be approximated.

$$E = 0.370 \times A$$

$$= 0.370 \times 5000$$

$$= 1850 \text{ MJ}$$

$$\text{or} = \frac{1850 \text{ MJ}}{3.6 \text{ MJ/kWh}}$$

$$= 514 \text{ kWh}$$

Reduced electrical demand charges result. A 514 kWh refrigeration load reduction will reduce chiller electrical demand during a one hour period by about 145 kW (where COP = 3.54). Such a reduction will reduce monthly demand charges by 145 x 6 = $870 based on an electrical demand charge of $6 per kW.

The same facility could also store 1850 MJ of thermal energy, during the heating season, if the temperature was allowed to float by 3°C. The temperature is allowed to increase during facility production periods and this stored heat energy is released during nonproduction periods when the area cools, thus reducing the building heating requirements. If the facility is heated by gas, the estimated fuel savings per production cycle can be estimated.

Natural gas cost $0.14/$m^3$

Heating system overall efficiency 68%

Heating value of natural gas (Appendix C) 37.2 MJ/m^3

$$\text{Gas cost per heating cycle} = \frac{1850 \text{ MJ} \times \$0.14/\text{m}^3}{37.2 \text{ MJ/m}^3 \times 0.68}$$

$$= \$10.24$$

On the basis of 5 heating cycles per week, a 16 week heating season when this stored heat can be used, and a 5 month cooling season, the annual dollar savings can be calculated.

Annual dollar savings = ($10.24 x 5 cycles/week x 16 weeks/yr) + (5 mo x $870/mo)

= $819 + $4,350 = $5,169

The capital cost to modify the controls and provide additional dampers on the exhaust and fresh air intake ducts is estimated to be $5,000.

$$\text{Simple payback} = \frac{\$5000}{\$5169}$$

= 1 year (approximately)

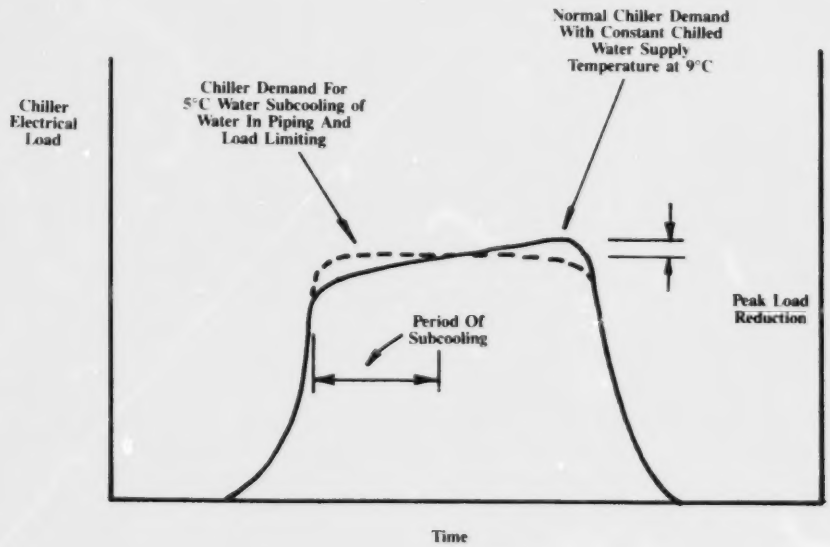
2. Thermal Storage in Equipment and Products

Industrial process equipment and products can be used in a manner similar to using the building fabric for thermal storage. For example, if the process equipment requires cooling during the normal production cycle, and the building requires heating during off-hours, consider reducing the amount of cooling at the end of shift to store heat in the equipment. Cooling would occur slowly during the off-hours, while partially offsetting the need for building heating. Simultaneous heating and cooling is reduced.

Where hot products such as hot coiled metal sheet must be cooled before further handling, consider placing the cooling areas at the building perimeter so that the heat loss from the product offsets the building heat losses.

3. Thermal Storage in Piping Systems

The *liquid contained in piping loops or tanks can be used as thermal storage media*. Consider a chilled water system that requires 9°C water to meet cooling requirements. The load causes the chiller to operate at maximum capacity thereby establishing the electrical demand charge for the month (Figure 22). Lowering the water temperature to 5°C before the expected peak cooling time puts additional thermal capacity into the chilled water enabling a load reduction at the chiller during electrical peak periods.



Chiller Subcooling Strategy
Figure 22

Consider a building chiller with a capacity of 1000 kW of refrigeration and 4000 litres of water in the chilled water piping system. The following calculation shows that lowering the water temperature by 4°C will store 18.6 kWh (67 MJ) of refrigeration capacity in the water.

$$E = V \times d \times DT \times cp$$

$$= \frac{4000 \times 1 \times 4 \times 4.1855}{3600}$$

$$= 18.6 \text{ kWh}$$

Where 3600 is conversion of kJ to kWh

Thermal storage allows 18.6 kW of refrigeration capacity to be advanced for one hour to avoid a peak period and to reduce the peak electrical demand charges. If the electrical demand charge for this facility is $6 per kW and chiller COP is 3.5, savings can be calculated.

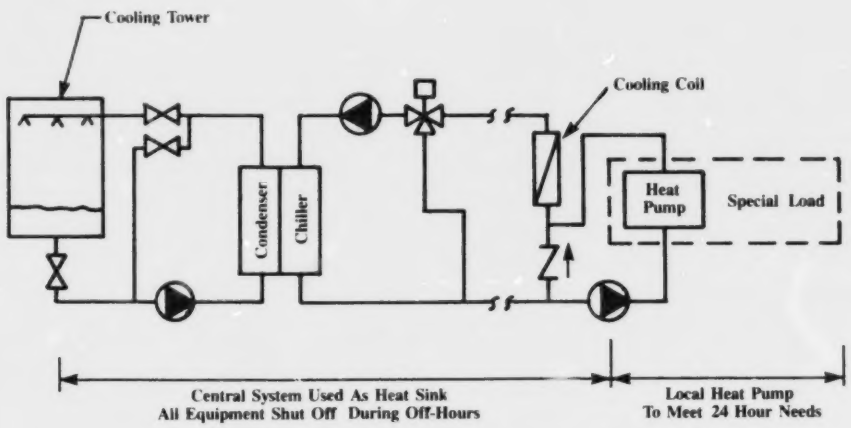
$$\text{Annual savings} = \frac{18.6 \times 6 \times 12}{3.5}$$

$$= \$383$$

An estimate of $700 for a timer and reset control allows the payback to be calculated.

$$\text{Simple payback} = \frac{\$700}{\$383} = 1.8 \text{ years}$$

A similar technique can be used to resolve local heating and cooling problems in a large facility. For example, a large office and commercial complex has a central chiller plant and piping system which transports chilled water to various areas of the building. Although the building is unoccupied during nights and weekends, the telephone switching room requires constant cooling. Part load performance of the chiller is poor. A water source heat pump, using the building's chilled water piping system as the heat sink, may permit all central systems to be shutdown, including the main pumps (Figure 23). A small pump could circulate the chilled water to satisfy the heat pump requirements. Depending on the load, the thermal storage capacity of the chilled water piping system is often sufficient to enable chiller shutdown for a full weekend. Energy savings result from shutting down the chiller, cooling tower and pumps.



Using Piping System As A Heat Sink For Special Applications
Figure 23

4. Raise Tank Temperature Settings

Hot water systems that include a storage tank can be operated to enhance thermal storage capabilities.

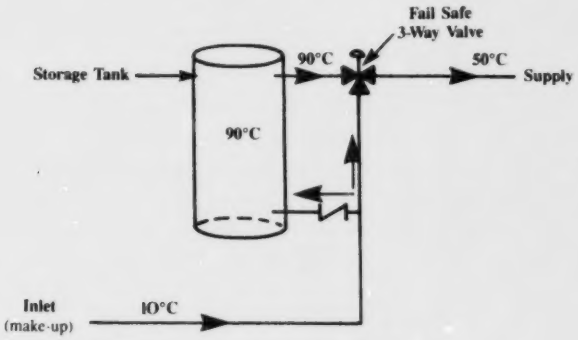
Consider a tank which maintains water at 50°C. Raising the temperature to 90°C increases the heat energy stored by the water in the tank. System water supply at 50°C is maintained by blending 90°C water from the tank with cold make-up water (Figure 24). The increased thermal storage capacity created by higher tank temperatures can reduce or eliminate the electrical domestic water heating load during peak demand periods. This approach may also remove the need for additional heating equipment when the building is expanded or loads are increased.

The proportion of supply water coming from the hot water in the tank is calculated from the following equation. (The effect of the return flow is neglected as the capacity is negligible.)

$$\text{Fraction of water from tank} = \frac{DT_1}{DT_2}$$

where DT_1 = (Supply temperature) − (Make-up temperature), (°C)

DT_2 = (Tank temperature) − (Make-up temperature), (°C)



Increased Water Storage Temperature
Figure 24

Consider the system in Figure 24 where hot water storage is 90°C, water supply is required at 50°C, and make-up water temperature is 10°C. The flow of 90°C water from the tank required to satisfy the 50°C supply temperature can be calculated.

$$\text{Fraction of water from supply tank} = \frac{(50 - 10)}{(90 - 10)}$$

$$= \frac{40}{80} = 0.50$$

The water withdrawal rate from the 90°C tank is 50 per cent of that required if the temperature of the water in the tank was maintained at 50°C. Thermal storage capacity has been increased by a factor of 2.0 (1 divided by 0.50) while permitting greater peak hot water loads to be satisfied without increasing the electrical demand for water heating.

Consider a domestic water heating system with a 5000 litre storage tank and 100 kW of electric heating capacity. During peak electrical demand periods, 60 kW of electricity was required to maintain the required water supply temperature of 50°C. The tank temperature setting was raised to 90°C using off-peak power. Operation of the electric water heaters was rescheduled to start one hour before the morning peak water use period, when the greatest capacity was needed. The heaters were automatically disconnected by a timer during the peak electrical demand periods. Altering the tank temperature in this manner, rather than holding the tank at 90°C throughout the entire day reduced the periods of high water temperature, which reduced heat loss rates and the risk of increased tank scaling and corrosion. A 60 kW demand can be eliminated from the monthly peak by automatically disconnecting the hot water heater during peak demand periods.

Annual dollar savings = Electrical demand reduction/month x mo/yr x $/kW

= 60 kW/mo x 12 mo/yr x $6/kW

= $4320/yr

The cost of the modification was estimated to be $3500.

$$\text{Simple payback} = \frac{3500}{4320} = 0.81 \text{ yr (10 months)}$$

A three-way valve is used to mix the high temperature hot water with the make-up water to effect the storage capacity increase. To avoid possible scalding to the users in the event of valve failure, the operation of the three-way valve should include fail-safe design features. Additional tank insulation may be beneficial, since raising the water storage temperature increases the rate of heat loss from the tank. Prior to raising tank operating temperatures, the tank manufacturer should be consulted to ensure that the tank temperature and pressure ratings will not be exceeded. In any open system, such as a domestic water heating system where fresh water regularly passes through the system, special precautions such as sacrificial anodes and water softeners may be necessary to control tank corrosion and scaling. Both actions increase when water temperatures are raised.

Retrofit Opportunities

Implemented retrofit opportunities are energy management actions that are *done once and for which the cost is significant*. Many of the opportunities in this category require detailed analysis by a specialist. The following are typical examples.

1. Add *pressurized water* storage tanks to heating and domestic hot water systems.
2. Provide heated or chilled water storage systems to avoid the purchase of additional heating or cooling equipment when a process is added or a building is expanded.
3. Drain waste water through a heat exchanger to transfer heat to make-up water. Add a storage tank to temporarily hold the preheated make-up water until it is needed. If necessary, consider using a heat pump to upgrade this heat.
4. Where space is at a premium, add solid *ice storage* to chilled water systems. When adequate space exists, consider flake ice storage or chilled water storage.
5. Add phase-change salt storage bins to heat pump, boiler, building heating, or solar collector systems. Where space permits, consider hot water storage tanks.

The worked examples presented identify the potential for electrical demand charge reductions and for utilizing waste heat.

Retrofit Worked Examples

1. Pressurized Water Systems

An increase in the temperature of storage tank contents will increase the thermal storage potential. Most tanks and system temperatures are limited to 90°C by the design rating of the tank. However, the water temperature can be raised with the introduction of a closed pressurized storage tank, and a heat exchanger connected to the heating system (Figure 25). This system requires a fail-safe three-way valve to ensure that high temperature water is isolated from the heating system.

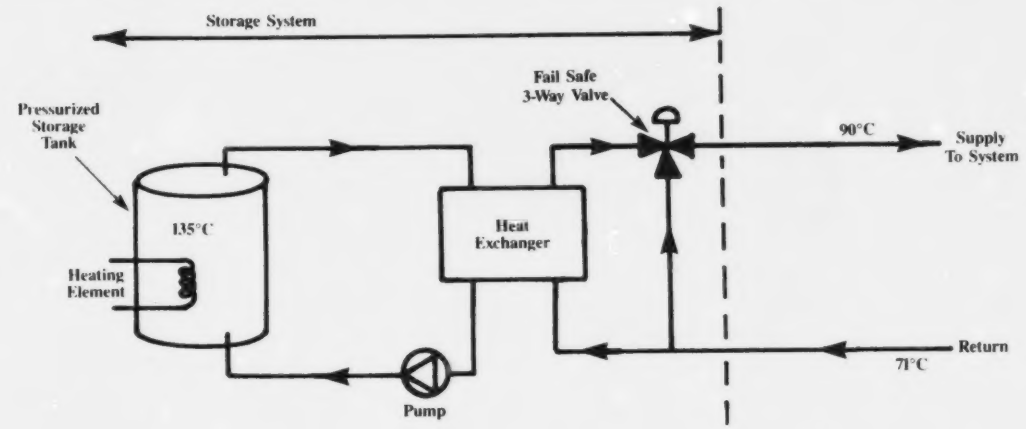
For a pressurized storage system connected to a building hot water circuit, the water in the storage tank could be heated to 135°C before the peak electrical demand occurs, and distributed at 90°C during the peak period. The additional heat storage capability of the water can be calculated.

$$E = \frac{M \times cp \times DT}{1000}$$

Note: For water, 1 kg = 1 L and cp = 4.1855 kJ/(kg·°C)

$$E = \frac{1 \times 4.1855 \times (135 - 90)}{1000}$$

= 0.188 MJ/kg or MJ/L



Pressurized Water System
Figure 25

Consider a building having 2600 kW of electric water heating and an electrical peak period of one hour. The required hot water supply temperature is 90°C. The installation of four 9500 L pressurized storage tanks will allow the storage of 38 000 L (4 x 9500) of 135°C hot water. By heating the water to 135 °C during off-peak electrical periods the electrical demand charges will be reduced because the 90°C water is obtained from storage instead of from the electric heaters. The installation of the four storage tanks and associated piping is estimated to cost $160,000.

Stored energy (MJ) = Volume (L) x additional energy storage capacity (MJ/L)

= 4 x 9500 x 0.188

= 7144 MJ

$$\text{Electrical load reduction (kW)} = \text{Energy stored (MJ)} \times \frac{\text{hours (h)}}{3.6 \text{ MJ/kWh}}$$

$$= \frac{7144 \times 1}{3.6}$$

= 1984 kW

Electrical demand charge $6/kW

Heating season 4.5 months

Annual dollar savings = 1984 x 6 x 4.5

= $53,568/yr

$$\text{Simple payback} = \frac{\$160{,}000}{\$53{,}568}$$

= 3.0 years

2. Waste Water Storage

Consider a batch process which discharges 20 000 L of 90°C water to drain. By adding a 20 000 L capacity holding tank and a heat exchanger system, some of the heat energy from the waste water can be transferred to the make-up water. If the waste water temperature is reduced to 30°C as it is drained through the heat exchanger, the heat stored in the waste water tank for each drain cycle can be calculated.

$$E = \frac{M \times cp \times DT}{1000}$$

$$= \frac{20\,000 \times 4.1855 \times (90 - 30)}{1000}$$

$$= 5023 \text{ MJ}$$

As the hot water passes through the heat exchanger, about 80 per cent of the stored heat is transferred to the fresh inlet water. Approximately 20 per cent of the heat is lost to evaporation and thermal losses from the tank and piping. One thousand drain cycles are scheduled per year.

The recovered heat reduces gas-fired boiler preheating of the make-up water. The annual value of the recovered heat for gas costing $\$0.14/m^3$ can be calculated.

$$\text{Annual dollar savings} = \frac{E \times Ef_e \times Cf \times N}{Ef_b \times \text{fuel heating value}}$$

Where, E = Energy in tank (MJ)

Ef_e = Heat exchanger efficiency (assume 0.80)

Ef_b = Boiler efficiency (assume 0.70)

N = Number of tank cycles per year

Cf = Fuel cost ($\$/m^3$)

$$\text{Annual dollar savings} = \frac{5023 \times 0.8 \times 0.14 \times 1000}{0.7 \times 37.2}$$

$$= \$21{,}604$$

The estimated cost for the heat exchanger, tank and associated piping is $60,000.

$$\text{Simple payback} = \frac{\$60{,}000}{\$21{,}604}$$

$$= 2.8 \text{ years}$$

The thermal storage capacity required for this application depends on the volume of liquid drained per cycle and the temperature difference between the water entering and leaving the heat exchanger or heat pump. Filtration may be required to remove contaminants which could foul the heat exchanger and reduce the heat transfer effectiveness.

3. Identifying Demand Charge Reductions

This example demonstrates the use of Worksheet 19-1 to identify and quantify potential demand charge reductions by shifting loads to low activity periods through the use of thermal storage. For examples of demand load reductions by limiting the connected load see Electrical, Module 3.

Consider a manufacturing plant where process and building heating and cooling equipment operates during nonproduction or low activity periods. The peak electrical demand as billed by the utility was recorded as 470 kW. During low activity periods, the load dropped to an average of 130 kW. Power readings for normal operation and low activity periods were recorded for all equipment considered suitable for thermal storage. Nameplate or equipment capacities were also recorded.

A comparison of equipment loads operating during low capacity periods indicated a potential demand saving of 170 kW could be realized. If the utility demand charge is $6 per kW, total demand charges can be reduced by $1,020 per month.

4. Building Addition

Additional boiler or chiller capacity is often required when adding processes or enlarging a building. A thermal storage system may eliminate the need to add new thermal storage equipment and permit the existing equipment to operate more efficiently. By storing thermal energy during low activity periods, heating or cooling load requirements may be satisfied. The increased load can be supplied by drawing energy out of storage. The cost of thermal storage equipment could be less than that of a new boiler or chiller. Energy costs would be lower because of lower demand charges.

The following example uses Worksheet 19-2 to estimate the storage capacity required to avoid the requirement for a new chiller. This worksheet can also be used for heating system thermal storage evaluation.

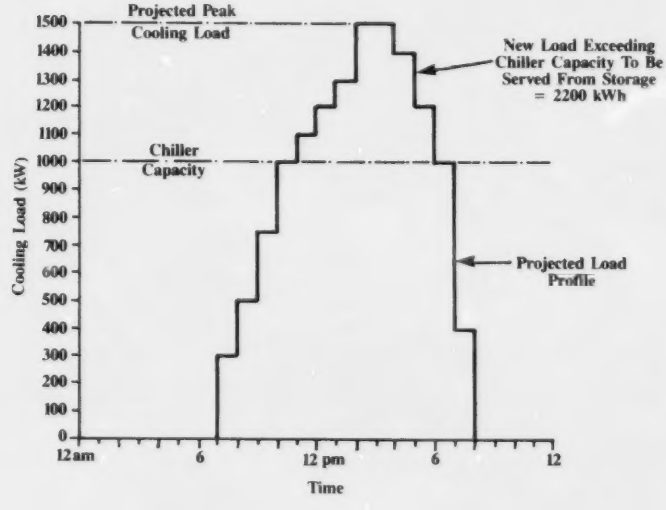
A building extension will increase the peak cooling load to 1500 kW of refrigeration, and the existing chiller has 1000 kW capacity. The new load could be directly satisfied with the addition of 500 kW of refrigeration capacity, but this would require a large capital expenditure and increased operating costs.

As an alternative, thermal storage could be provided to meet the new peak thermal load. The projected daily thermal load profile of the facility is shown in Column A on Worksheet 19-2 and plotted in Figure 26. Column C shows that the existing chiller will be overloaded from 11 am to 6 pm. Column E shows that between 7 pm and 10 am there is surplus chiller capacity which could be used to charge a storage system.

The total of Column C shows that 2200 kWh of refrigeration would have to be drawn from storage to meet the new load. The total of Column E reflects the amount of cooling which could be put into storage. As this capacity of 13 050 kWh is greater than the needed 2200 kWh of storage, the existing chiller will have adequate capacity to operate a storage system and meet all thermal load requirements.

Adding 500 kW of chiller capacity would require a new chiller, pumps, starters, wiring, piping, and controls. Construction costs for a thermal storage system consisting of storage tanks, pumps, piping, wiring, automatic controls and structural changes to accomodate the tanks normally are substantially less.

Electrical demand for cooling would be limited to 285 kW using the existing chiller (1000 kW divided COP of 3.5), rather than increasing to 430 kW (1500 kW divided by 3.5). This is a reduction of 145 kW in demand.



Thermal Load Profile For Retrofit Worked Example 4
Figure 26

Demand Charge Reduction

Worksheet 19-1
Page 1 of 1

Company: WORKED EXAMPLE 3 Date: JUNE 86

Location: RETROFIT By: MBE

Electrical peak demand as billed by utility 470 kW (1)

Average measured facility demand – low activity periods (base load) 130 kW (2)

Demand charges are optimized when demand remains constant.

$$= \frac{(1) + (2)}{2} = \frac{470 + 130}{2}$$

= 300 kW (3)

Maximum potential demand savings when thermal storage is used to transfer loads to low activity periods.

470 (1) – 300 (3)

= 170 kW (4)

Suggested Systems Suitable For Thermal Storage	Equipment Capacity (kW)	Existing Load During Operating Period (kW)	Existing Load During Low Activity Period (kW)	Thermal Storage Potential (kW)
Elect. Process – Heating	200	200	50	150
Elect. Process – Cooling	100	80	20	80
Space Heating	50	0	25	0
Space Cooling	50	50	0	50
DHW Heating	10	10	2	8
Other	5	5	5	0
Totals	415	345	102	288 (5)

If (5) is greater than (4) maximum potential demand savings may be realized.

If (5) is smaller than (4) potential savings will be less attractive.

Potential demand savings can be calculated.

Demand charges by utility $ 6 /kW/month (6)

Demand reduction: the lessor of (4) or (5) 170 kW (7)

Maximum potential cost savings = $ 6 (6) x 170 (7)

= $ 1020 /month

Notes:

1. Identify systems and equipment that have the most thermal storage potential.
2. Make sure that charging of a thermal storage system does not create a new higher billing demand in the low activity period.
3. If the maximum potential cost savings are significant, a specialist should be retained to provide an in-depth analysis.

Determination of Thermal Storage Charging Capacity of Existing Equipment and Waste Streams

Worksheet 19-2

Page 1 of 2

Company: WORKED EXAMPLE 4 Date: MARCH 1986

Location: RETROFIT By: MBE

Steps

(1) Predict the peak day mean hourly heating or cooling load on existing equipment being considered. Such equipment may be a boiler, a chiller or a new process. Put these hourly predictions in column A.

(2) Determine the capacity of the existing equipment or waste stream and compare with numbers in A. Into column B insert the lower of A or equipment capacity.

(3) Subtract B from A and insert result in column C.

(4) The size of new equipment to install if storage is not used, is the highest value in C.

(5) Amount of useable storage required to avoid adding new equipment is the total of C.

(6) Insert the higher of A or equipment capacity into column D.

(7) Subtract A from D and insert result in column E.

(8) Total of E is storage charging capacity. If total of Column E is smaller than total of Column C then not all required storage can be regenerated and some new equipment capacity will be required.

Determination of Thermal Storage Charging Capacity of Existing Equipment and Waste Streams
Worksheet 19-2
Page 2 of 2

Company: WORKED EXAMPLE 4 Date: MARCH 1986

Location: RETROFIT By: MBE

HOURS	PREDICTED LOAD PROFILE (kW) A	LOWER OF A OR CAPACITY (kW) B	OVERLOAD A-B (kW) C	HIGHER OF A OR CAPACITY (kW) D	EXCESS CAPACITY D-A (kW) E
12pm-1am	0	0	0	1000	1000
1am-2am	0	0	0	1000	1000
2am-3am	0	0	0	1000	1000
3am-4am	0	0	0	1000	1000
4am-5am	0	0	0	1000	1000
5am-6am	0	0	0	1000	1000
6am-7am	0	0	0	1000	1000
7am-8am	300	300	0	1000	700
8am-9am	500	500	0	1000	500
9am-10am	750	750	0	1000	250
10am-11am	1000	1000	0	1000	0
11am-12am	1100	1000	100	1100	0
12am-1pm	1200	1000	200	1200	0
1pm-2pm	1300	1000	300	1300	0
2pm-3pm	1500	1000	500	1500	0
3pm-4pm	1500	1000	500	1500	0
4pm-5pm	1400	1000	400	1400	0
5pm-6pm	1200	1000	200	1200	0
6pm-7pm	1000	1000	0	1000	0
7pm-8pm	400	400	0	1000	600
8pm-9pm	0	0	0	1000	1000
9pm-10pm	0	0	0	1000	1000
10pm-11pm	0	0	0	1000	1000
11pm-12am	0	0	0	1000	1000
		TOTAL	2200 kWh		13050 kWh

APPENDICES

A Glossary
B Tables
C Common Conversions
D Worksheets

Glossary

Audit, diagnostic— The analysis of a potential opportunity to save energy which could involve the assessment of the current process operation, records, calculation of savings, and estimates of capital and operating costs so that financial viability can be established.

Audit, walk through — The visual inspection of a facility to observe how energy is used or wasted.

Degradable — Capable of being chemically broken down to change the physical properties.

Degree Days — A totalization of the difference between the mean daily outdoor dry bulb temperature and a reference temperature. For example, ten heating degree days below 18°C is equivalent of one day at 8°C or ten days at 17°C. Degree days may be referred to as either "heating" or "cooling".

Energy — The capacity for doing work; taking a number of forms that may be transformed from one into another, such as thermal (heat), mechanical (work), electrical, and chemical; measured in kilowatt-hours (kWh) or megajoules (MJ).

Energy, waste — Energy which is lost without being fully utilized. It may include the energy in the form of steam, exhaust gases, discharge water or even refuse.

Load, base — The thermal or electric loads that occur continually and at about the same level. For example, in a cooling system the electrical base load could consist of fans and pumps that operate continuously, and the chillers would be fluctuating loads not usually included in that base load.

Load, peak — The highest electrical or thermal load occurring during the period of time being considered.

Make-up Air — Outside air that is added to a building to replace air lost by exhaust or exfiltration.

Make-up Water — Water that is added to a domestic or process water system to replace water lost to evaporation, bleed-off and drain.

Off-peak — Times when the power requirement or load on a machine is lower than the peak requirement. Off peak times usually occur when occupancy and activity levels are low.

Sacrificial Anode — An electrode that slowly decays to protect other equipment against corrosion.

Seasonal Boiler Efficiency — A total heat energy output divided by the total energy input over the period of a full heating season.

Setback — Temperature setting when a thermostat is lowered during unoccupied periods.

Simple Payback — The time required for an expenditure to be repaid by the related annual dollar savings.

Standby Heat Losses — Refers to the energy that is lost from the thermal storage medium because of heat transmission through the walls of storage tanks and system piping.

State — Solid, liquid or gas.

Storage Capacity — The amount of thermal energy that can be stored in a storage system, expressed in kWh or MJ.

Storage System — Any tank, vessel, enclosure, bin or container with accessories such as pumps and controls, for storing thermal energy.

Stratification — The temperature layering effect in slow moving masses of air or liquid caused by differences in density between the warmer and cooler fluids. Buoyancy causes the less dense warm air or liquid to move to the top of any room or container. Cold air or liquid falls. The interface between the fluids of different temperature is called the thermocline.

Surplus Heat — Heat created by processes, occupants, or lights which is more than needed to maintain equilibrium in space or process temperatures.

Temperature Degradation — Temperature reduction within a heat energy storage medium, or temperature increase in a cooling energy storage medium, caused by blending and heat transfer through tank walls and floor.

Temperature, Mean — The average of the minimum and maximum temperatures.

TYPICAL SPECIFIC HEATS AND DENSITIES FOR SELECTED MATERIALS
TABLE 1

Material	Specific Heat [kJ/(kg·°C)]	Density (kg/m^3)
Brick	0.80	1920
Concrete	0.65	2300
Clay Tile	0.92	1000
Concrete Blocks	0.92	—
Limestone	0.91	1650
Ice (at 0°C)	2.04	921*
Water (at 20°C)	4.1855	998
Hardwoods	1.63	550
Softwoods	1.63	430
Gypsum Plaster	1.09	2110
Paraffin Wax	2.90	900

*Ice at 0°C is less dense than water; for the purposes of this module, use a value of 1000 kg/m^3 for approximation purposes.

CHARACTERISTICS OF THERMAL STORAGE SUBSTANCES
TABLE 2

	Required Volume (L/MJ)	Temperature (°C)	Installation	Temperature Degradation	Life Of Material
LIQUIDS					
Chilled Water	30	5 to 10 Range	Large	Blending Problem	Permanent
Hot Water	30	38 to 90 Range	Large	Some Blending	Permanent
PHASE CHANGE					
Solid Ice	3.0	−5 to +10 Range	Distributed	No	Permanent
Flake Ice	3.0	−5 to +10 Range	Large	No	Permanent
Glauber's Salt	2.3	Freezing Point 32	Distributed	No	Limited
Calcium chloride hexahydrate	3.4	Freezing Point 29	Distributed	No	No Known Limit
Magnesium eutectic salt	4.9	Freezing Point 58	Distributed	No	No Known Limit
Magnesium nitrate hexahydrate	4.0	Freezing Point 89	Distributed	No	No Known Limit
SOLIDS					
Rocks	76	—	Large	No	Permanent
Sand	100	—	Distributed	No	Permanent

COMMON CONVERSIONS

1 barrel (35 Imp gal) (42 US gal)	= 159.1 litres
1 gallon (Imp)	= 1.20094 gallon (US)
1 horsepower (boiler)	= 9809.6 watts
1 horsepower	= 2545 Btu/hour
1 horsepower	= 0.746 kilowatts
1 joule	= 1 N-m
Kelvin	= (°C + 273.15)
1 kilowatt-hour	= 3600 kilojoules
1 Newton	= 1 kg-m/s^2
1 therm	= 10^5 Btu
1 ton (refrigerant)	= 12002.84 Btu/hour
1 ton (refrigerant)	= 3516.8 watts
1 watt	= 1 joule/second
Rankine	= (°F + 459.67)

Cubes

1 yd^3	= 27 ft^3
1 ft^3	= 1728 in^3
1 cm^3	= 1000 mm^3
1 m^3	= 10^6 cm^3
1 m^3	= 1000 L

Squares

1 yd^2	= 9 ft^2
1 ft^2	= 144 in^2
1 cm^2	= 100 mm^2
1 m^2	= 10000 cm^2

SI PREFIXES

Prefix	Symbol	Magnitude	Factor
tera	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
mega	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hecto	h	100	10^2
deca	da	10	10^1
deci	d	0.1	10^{-1}
centi	c	0.01	10^{-2}
milli	m	0.001	10^{-3}
micro	u	0.000 001	10^{-6}
nano	n	0.000 000 001	10^{-9}
pica	p	0.000 000 000 001	10^{-12}

UNIT CONVERSION TABLES
METRIC TO IMPERIAL

FROM	SYMBOL	TO	SYMBOL	MULTIPLY BY
amperes/square centimetre	A/cm^2	amperes/square inch	A/in^2	6.452
Celsius	°C	Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimetres	cm	inches	in	0.3937
cubic centimetres	cm^3	cubic inches	in^3	0.06102
cubic metres	m^3	cubic foot	ft^3	35.314
grams	g	ounces	oz	0.03527
grams	g	pounds	lb	0.0022
grams/litre	g/L	pounds/cubic foot	lb/ft^3	0.06243
joules	J	Btu	Btu	9.480×10^{-4}
joules	J	foot-pounds	ft-lb	0.7376
joules	J	horsepower-hours	hp-h	3.73×10^{-7}
joules/metre, (Newtons)	J/m, N	pounds	lb	0.2248
kilograms	kg	pounds	lb	2.205
kilograms	kg	tons (long)	ton	9.842×10^{-4}
kilograms	kg	tons (short)	tn	1.102×10^{-3}
kilometres	km	miles (statute)	mi	0.6214
kilopascals	kPa	atmospheres	atm	9.87×10^{-3}
kilopascals	kPa	inches of mercury (@ 32°F)	in Hg	0.2953
kilopascals	kPa	inches of water (@ 4°C)	in H_2O	4.0147
kilopascals	kPa	pounds/square inch	psi	0.1450
kilowatts	kW	foot-pounds/second	ft-lb/s	737.6
kilowatts	kW	horsepower	hp	1.341
kilowatt-hours	kWh	Btu	Btu	3413
litres	L	cubic foot	ft^3	0.03531
litres	L	gallons (Imp)	gal (Imp)	0.21998
litres	L	gallons (US)	gal (US)	0.2642
litres/second	L/s	cubic foot/minute	cfm	2.1186
lumen/square metre	lm/m^2	lumen/square foot	lm/ft^2	0.09290
lux, lumen/square metre	lx, lm/m^2	footcandles	fc	0.09290
metres	m	foot	ft	3.281
metres	m	yard	yd	1.09361
parts per million	ppm	grains/gallon (Imp)	gr/gal (Imp)	0.07
parts per million	ppm	grains/gallon (US)	gr/gal (US)	0.05842
permeance (metric)	PERM	permeance (Imp)	perm	0.01748
square centimetres	cm^2	square inches	in^2	0.1550
square metres	m^2	square foot	ft^2	10.764
square metres	m^2	square yards	yd^2	1.196
tonne (metric)	t	pounds	lb	2204.6
watt	W	Btu/hour	Btu/h	3.413
watt	W	lumen	lm	668.45

4138T/T33(-4)

UNIT CONVERSION TABLES
IMPERIAL TO METRIC

FROM	SYMBOL	TO	SYMBOL	MULTIPLY BY
ampere/in^2	A/in^2	ampere/cm^2	A/cm^2	0.1550
atmospheres	atm	kilopascals	kPa	101.325
British Thermal Unit	Btu	joules	J	1054.8
Btu	Btu	kilogram-metre	kg-m	107.56
Btu	Btu	kilowatt-hour	kWh	2.928×10^{-4}
Btu/hour	Btu/h	watt	W	0.2931
calorie, gram	cal or g-cal	joules	J	4.186
chain	chain	metre	m	20.11684
cubic foot	ft^3	cubic metre	m^3	0.02832
cubic foot	ft^3	litre	L	28.32
cubic foot/minute	cfm	litre/second	L/s	0.47195
cycle/second	c/s	Hertz	Hz	1.00
Fahrenheit	°F	Celsius	°C	(°F-32)/1.8
foot	ft	metre	m	0.3048
footcandle	fc	lux, lumen/ square metre	lx, lm/m^2	10.764
footlambert	fL	candela/square metre	cd/m^2	3.42626
foot-pounds	ft-lb	joule	J	1.356
foot-pounds	ft-lb	kilogram-metres	kg-m	0.1383
foot-pounds/second	ft-lb/s	kilowatt	kW	1.356×10^{-3}
gallons (Imp)	gal (Imp)	litres	L	4.546
gallons (US)	gal (US)	litres	L	3.785
grains/gallon (Imp)	gr/gal (Imp)	parts per million	ppm	14.286
grains/gallon (US)	gr/gal (US)	parts per million	ppm	17.118
horsepower	hp	watts	W	745.7
horsepower-hours	hp-h	joules	J	2.684×10^6
inches	in	centimetres	cm	2.540
inches of Mercury (@ 32°F)	in Hg	kilopascals	kPa	3.386
inches of water (@ 4°C)	in H_2O	kilopascals	kPa	0.2491

UNIT CONVERSION TABLES
IMPERIAL TO METRIC (cont'd)

FROM	SYMBOL	TO	SYMBOL	MULTIPLY BY
lamberts	* L	candela/square metre	cd/m^2	3.183
lumen/square foot	lm/ft^2	lumen/square metre	lm/m^2	10.76
lumen	lm	watt	W	0.001496
miles (statute)	mi	kilometres	km	1.6093
ounces	oz	grams	g	28.35
perm (at 0°C)	perm	kilogram per pascal-second-square metre	$kg/Pa\text{-}s\text{-}m^2$ (PERM)	5.721×10^{-11}
perm (at 23°C)	perm	kilogram per pascal-second-square metre	$kg/Pa\text{-}s\text{-}m^2$ (PERM)	5.745×10^{-11}
perm-inch (at 0°C)	perm. in.	kilogram per pascal-second-metre	kg/Pa-s-m	1.4532×10^{-12}
perm-inch (at 23°C)	perm. in.	kilogram per pascal-second-metre	kg/Pa-s-m	1.4593×10^{-12}
pint (Imp)	pt	litre	L	0.56826
pounds	lb	grams	g	453.5924
pounds	lb	joules/metre, (Newtons)	J/m, N	4.448
pounds	lb	kilograms	kg	0.4536
pounds	lb	tonne (metric)	t	4.536×10^{-4}
pounds/cubic foot	lb/ft^3	grams/litre	g/L	16.02
pounds/square inch	psi	kilopascals	kPa	6.89476
quarts	qt	litres	L	1.1365
slug	slug	kilograms	kg	14.5939
square foot	ft^2	square metre	m^2	0.09290
square inches	in^2	square centimetres	cm^2	6.452
square yards	yd^2	square metres	m^2	0.83613
tons (long)	ton	kilograms	kg	1016
tons (short)	tn	kilograms	kg	907.185
yards	yd	metres	m	0.9144

* "L" as used in Lighting

4138T/T33(-2)

The following typical values for conversion factors may be used when actual data are unavailable. The MJ and Btu equivalencies are heats of combustion. Hydrocarbons are shown at the higher heating value, wet basis. Some items listed are typically feedstocks, but are included for completeness and as a reference source. The conversion factors for coal are approximate since the heating value of a specific coal is dependent on the particular mine from which it is obtained.

ENERGY TYPE	METRIC	IMPERIAL
COAL		
— metallurgical	29,000 megajoules/tonne	25.0×10^6 Btu/ton
— anthracite	30,000 megajoules/tonne	25.8×10^6 Btu/ton
— bituminous	32,100 megajoules/tonne	27.6×10^6 Btu/ton
— sub-bituminous	22,100 megajoules/tonne	19.0×10^6 Btu/ton
— lignite	16,700 megajoules/tonne	14.4×10^6 Btu/ton
COKE		
— metallurgical	30,200 megajoules/tonne	26.0×10^6 Btu/ton
— petroleum		
— raw	23,300 megajoules/tonne	20.0×10^6 Btu/ton
— calcined	32,600 megajoules/tonne	28.0×10^6 Btu/ton
PITCH	37,200 megajoules/tonne	32.0×10^6 Btu/ton
CRUDE OIL	38,5 megajoules/litre	5.8×10^6 Btu/bbl
No. 2 OIL	38.68 megajoules/litre	5.88×10^6 Btu/bbl $.168 \times 10^6$ Btu/IG
No. 4 OIL	40.1 megajoules/litre	6.04×10^6 Btu/bbl $.173 \times 10^6$ Btu/IG
No. 6 OIL (RESID. BUNKER C)		
@ 2.5% sulphur	42.3 megajoules/litre	6.38×10^6 Btu/bbl $.182 \times 10^6$ Btu/IG
@ 1.0% sulphur	40.5 megajoules/litre	6.11×10^6 Btu/bbl $.174 \times 10^6$ Btu/IG
@ .5% sulphur	40.2 megajoules/litre	6.05×10^6 Btu/bbl $.173 \times 10^6$ Btu/IG
KEROSENE	37.68 megajoules/litre	$.167 \times 10^6$ Btu/IG
DIESEL FUEL	38.68 megajoules/litre	$.172 \times 10^6$ Btu/IG
GASOLINE	36.2 megajoules/litre	$.156 \times 10^6$ Btu/IG
NATURAL GAS	37.2 megajoules/m^3	1.00×10^6 Btu/MCF
PROPANE	50.3 megajoules/kg 26.6 megajoules/litre	$.02165 \times 10^6$ Btu/lb $.1145 \times 10^6$ Btu/IG
ELECTRICITY	3.6 megajoules/kWh	$.003413 \times 10^6$ Btu/kWh

Demand Charge Reduction

Worksheet 19-1
Page 1 of 1

Company: _____ Date: _____

Location: _____ By: _____

Electrical peak demand as billed by utility _____ kW (1)

Average measured facility demand – low activity periods (base load) _____ kW (2)

Demand charges are optimized when demand remains constant.

$$= \frac{(1) + (2)}{2} = \frac{\quad + \quad}{2}$$

= _____ kW (3)

Maximum potential demand savings when thermal storage is used to transfer loads to low activity periods.

_____ (1) – _____ (3)

= _____ kW (4)

Suggested Systems Suitable For Thermal Storage	Equipment Capacity (kW)	Existing Load During Operating Period (kW)	Existing Load During Low Activity Period (kW)	Thermal Storage Potential (kW)
Elect. Process – Heating				
Elect. Process – Cooling				
Space Heating				
Space Cooling				
DHW Heating				
Other				
Totals	_____	_____	_____	_____ (5)

If (5) is greater than (4) maximum potential demand savings may be realized.

If (5) is smaller than (4) potential savings will be less attractive.

Potential demand savings can be calculated.

Demand charges by utility $_____/kW/month (6)

Demand reduction: the lessor of (4) or (5) _____ kW (7)

Maximum potential cost savings = $ _____ (6) x _____ (7)

= $ _____/month

Notes:

1. Identify systems and equipment that have the most thermal storage potential.
2. Make sure that charging of a thermal storage system does not create a new higher billing demand in the low activity period.
3. If the maximum potential cost savings are significant, a specialist should be retained to provide an in-depth analysis.

Determination of Thermal Storage Charging Capacity of Existing Equipment and Waste Streams

Worksheet 19-2

Page 1 of 2

Company: _____ Date: _____

Location: _____ By: _____

Steps

(1) Predict the peak day mean hourly heating or cooling load on existing equipment being considered. Such equipment may be a boiler, a chiller or a new process. Put these hourly predictions in column A.

(2) Determine the capacity of the existing equipment or waste stream and compare with numbers in A. Into column B insert the lower of A or equipment capacity.

(3) Subtract B from A and insert result in column C.

(4) The size of new equipment to install if storage is not used, is the highest value in C.

(5) Amount of useable storage required to avoid adding new equipment is the total of C.

(6) Insert the higher of A or equipment capacity into column D.

(7) Subtract A from D and insert result in column E.

(8) Total of E is storage charging capacity. If total of Column E is smaller than total of Column C then not all required storage can be regenerated and some new equipment capacity will be required.

Determination of Thermal Storage Charging Capacity of Existing Equipment and Waste Streams

Worksheet 19-2

Page 2 of 2

Company: _____ Date: _____

Location: _____ By: _____

HOURS	PREDICTED LOAD PROFILE (kW) A	LOWER OF A OR CAPACITY (kW) B	OVERLOAD A-B (kW) C	HIGHER OF A OR CAPACITY (kW) D	EXCESS CAPACITY D-A (kW) E
12pm-1am					
1am-2am					
2am-3am					
3am-4am					
4am-5am					
5am-6am					
6am-7am					
7am-8am					
8am-9am					
9am-10am					
10am-11am					
11am-12am					
12am-1pm					
1pm-2pm					
2pm-3pm					
3pm-4pm					
4pm-5pm					
5pm-6pm					
6pm-7pm					
7pm-8pm					
8pm-9pm					
9pm-10pm					
10pm-11pm					
11pm-12am					
			_____		_____
		TOTAL	_____ kWh		_____ kWh

PRÉFACE

L'art et la science de la gestion de l'énergie ont accompli des progrès remarquables au cours de la dernière décennie. La gestion de l'énergie est devenue une discipline sérieuse dans le cadre du processus de gestion de la plupart des entreprises qui connaissent le succès.

D'abord, au début des années 70, on a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie afin de réduire la menace de pénurie d'énergie que pesait sur le Canada, de même que la dépendance du pays à l'endroit du pétrole étranger. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix n'a pas tardé a donner une signification nouvelle à l'expression «économie d'énergie»: réduire le coût de l'énergie.

Nombre d'industries, de commerces et d'organismes publics ont relevé le défi et abaissé les coûts d'énergie jusque dans une proportion de 50%. On est ainsi arrivé à utiliser l'énergie de façon rationnelle, grâce à des mesures telles que des programmes d'information à l'intention du personnel, des moyens d'entretien plus à point, la simple élimination du gaspillage, et en mettant de l'avant des projets aptes à moderniser ou améliorer les installations et l'équipement.

Pour en arriver maintenant à économiser d'avantage l'énergie, il importe de mieux connaître la technologie et ses applications en plus d'avoir recours à des appareils à haut rendement énergétique.

A la demande du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, du Programme des groupes de travail sur la gestion de l'énergie dans les secteurs commercial et institutionnel, et d'associations professionnelles et commerciales intéressées, la Division de l'énergie industrielle du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources a élaboré une série de modules techniques portant sur la gestion de l'énergie.

Ces manuels aideront les gestionnaires et le personnel d'exploitation à découvrir les possibilités de gestion de l'énergie dans leur cadre de travail. On y trouve une quantité de renseignements pratiques, notamment des équations mathématiques, des renseignements généraux sur des techniques éprouvées, ainsi que des exemples concrets d'économie d'énergie.

Pour obtenir de plus amples renseignements concernant les modules figurant dans la liste qui suit ou la documentation utilisée dans le cadre des ateliers, y compris les études de cas, veuillez écrire à l'adresse suivante:

La Division de la gestion de l'énergie dans les
entreprises et dans le secteur gouvernemental
Direction des économies d'énergie
Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources
580, rue Booth
Ottawa, Ontario
K1A 0E4

Gestion de l'énergie et participation des employés
Évaluation de la consommation
Analyse financière énergétique
Compatibilité de la gestion énergétique
Récupération de la chaleur perdue
Isolation thermique des équipements
Éclairage
Électricité
Moteurs électriques économiseurs d'énergie
Combustion
Appareillage de chaufferie
Fours, sécheurs et fours de cuisson
Systèmes à vapeur et à condensat
Chauffage et refroidissement énergétique (Vapeur et eau)
Conditionnement de l'air
Refroidissement et pompes à chaleur
Réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé
Ventilateurs et pompes
Compresseurs et turbines
Mesures et contrôles
Régulation automatique
Manutention des matériaux et transport sur place
Point de vue architectural
Accumulation thermique

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M91-6/19F au Canada: $4.00
ISBN 0-662-93341-9 à l'étranger: $4.80

Prix sujet à changement sans préavis

Tous droits réservés. On ne peut reproduire aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit (électronique, mécanique, photographique) ni en faire un enregistrement sur support magnétique ou autre pour fins de dépistage ou après diffusion, sans autorisation écrite préalable des Services d'édition, Centre d'édition du gouvernement du Canada, Ottawa, Canada K1A 0S9.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
Objectif	1
Contenu	1
NOTIONS DE BASE	3
Termes et définitions	3
Objectifs de l'accumulation thermique	4
Utilisation de l'énergie gaspillée ou excédentaire	5
Réduction de la prime de puissance	6
Différer l'achat d'équipements	6
Chaleur sensible et chaleur latente	8
Calculs de base	8
Calculs relatifs à l'accumulation de chaleur sensible	8
Calculs relatifs à l'accumulation thermique avec changement d'état	9
Autres facteurs	10
Consommation énergétique des systèmes de chauffage, de refroidissement et de pompes à chaleur	10
Limites du système de stockage d'énergie	10
Profils de charge thermique	11
Optimisation des systèmes classiques	11
Analyse énergétique	11
Résumé	12
APPAREILLAGE	13
Milieux thermiques	13
Accumulation de chaleur sensible	13
Milieux liquides	13
Mélange et perte de chaleur dans un milieu liquide	13
Milieu solide	17
Milieu thermique à changement de phase	18
Étangs et nappes aquifères	19
Systèmes de stockage d'énergie types	20
Accumulation de chaleur et de froid obtenue par refroidisseur	20
Accumulation de glace	21
Récupération de chaleur par accumulation thermique	23

Appareils de régulation 24

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE 25

Avant d'étudier les possibilités d'accumulation thermique . . . 25

Possibilités de maintenance 25

Possibilités d'amélioration de coût modique 26

Exemples concrets d'amélioration de coût modique 26
1. Exploiter les possibilités d'accumulation thermique de la charpente du bâtiment. 26
2. Accumulation thermique provenant de l'équipement et des produits. 27
3. Accumulation thermique provenant de réseaux de tuyauteries. 27
4. Élever le point de consigne de température d'un réservoir. 29

Possibilités de rénovation 30

Exemples concrets de possibilités de rénovation 30
1. Systèmes à eau sous pression 30
2. Accumulation de l'eau usée 32
3. Réduction de la prime de puissance 32
4. Agrandissement d'un bâtiment 33

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes
D Feuilles de travail

INTRODUCTION

On entend par accumulation thermique ou stockage d'énergie, la mise en réserve d'une quantité d'énergie de chauffage ou de refroidissement jusqu'au moment de son utilisation. La chaleur excédentaire générée dans un bâtiment pendant le jour peut, par exemple, être emmagasinée pour réchauffer ce dernier la nuit alors que la charge thermique est habituellement plus grande. Ce module examinera les facteurs qui favorisent le stockage d'énergie dans les bâtiments commerciaux, les installations industrielles et les immeubles de caractère public aidant ainsi les propriétaires d'immeubles et les opérateurs de systèmes dans l'analyse des possibilités de conserver de l'énergie et de réduire leurs coûts énergétiques.

Objectif

L'objectif du présent module se résume comme suit:

- Déterminer les principaux avantages de l'accumulation thermique.
- Examiner les sources potentielles d'énergie thermique peu coûteuses ainsi que les techniques et l'équipement utilisés pour mettre cette énergie en réserve.
- Exposer des méthodes de calcul permettant l'évaluation préliminaire des possibilités d'accumulation thermique.
- Fixer des paramètres généraux nécessaires au bon fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie.
- Expliquer, à l'aide de feuilles de travail et d'exemples, les méthodes à suivre pour évaluer les possibilités d'accumulation thermique.

Contenu

Le présent module comprend les chapitres suivants:

- Le chapitre *Notions de base* décrit les principaux paramètres d'un système de stockage d'énergie, examine les possibilités de stocker de l'énergie et expose des équations de base pour aider l'usager à dimensionner l'équipement.
- Le chapitre *Appareillage* étudie les composants de base utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie et présente un certain nombre de systèmes types.
- Le chapitre *Possibilités de gestion de l'énergie* présente une série de possibilités pour les systèmes de stockage d'énergie. Un certain nombre d'exemples concrets combinés à des feuilles de travail sont étudiés pour aider l'usager à évaluer les possibilités d'une installation.
- Les *Annexes* réunissent un glossaire, des tables de conversion, des tables et des feuilles de travail.

NOTIONS DE BASE

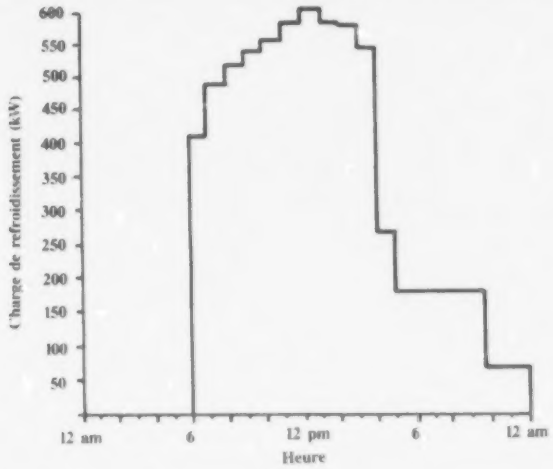
Le chauffe-eau domestique est sans doute l'exemple d'accumulation thermique le plus connu. L'eau froide du réservoir est chauffée lentement et maintenue à la température désirée jusqu'au moment de son utilisation. L'eau chaude est souvent prélevée plus rapidement qu'elle n'est produite, réduisant ainsi la réserve.

- L'eau du réservoir est appelée *milieu thermique*. C'est la substance qui, en fait, emmagasine ou contient l'énergie thermique ou calorifique. Le réservoir en soit n'accumule aucune énergie thermique, il ne fait qu'emmagasiner l'eau.
- Lorsque l'eau est chauffée et que la température s'élève dans le réservoir, le système de stockage d'énergie est *chargé*. Inversement, lorsque l'eau chaude est prélevée et remplacée par de l'eau froide, le système de stockage d'énergie est *déchargé*.
- On obtient de l'*énergie thermique (chaleur)* en convertissant une autre forme d'énergie, comme l'électricité, en chaleur. Le gaz naturel, le gaz propane, le mazout, le bois et le charbon peuvent tous être convertis en énergie thermique.
- La *charge thermique*, qui représente la quantité d'eau chaude exigée, est directement fonction des besoins de l'usager, que l'eau soit chauffée lentement ou rapidement. En effet, même si les petits chauffe-eau réchauffent l'eau plus lentement que les gros, la quantité totale de chaleur utilisée est la même.
- Une fois le réservoir rempli, le maintien de la température de l'eau n'exige que très peu d'énergie: l'énergie ajoutée ne fait que compenser la déperdition de chaleur de l'enveloppe du réservoir.
- La *capacité thermique* du réservoir augmente en fonction des dimensions de l'appareil et de la température de l'eau chaude.

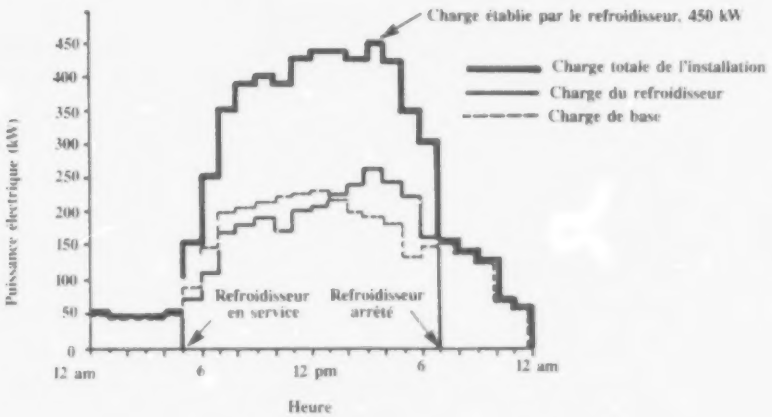
Avant d'examiner les caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie et leurs applications, il est bon de connaître quelques termes et définitions.

Termes et définitions

- *Consommation électrique et prime de puissance* – Les compagnies d'électricité facturent habituellement l'électricité selon la *consommation* et la *puissance appelée*. La consommation est l'énergie électrique utilisée pendant une période déterminée et est facturée en dollars par kilowatt-heure ($/kWh). La puissance appelée est le taux maximal d'énergie consommée pendant une courte période. Le tarif de la prime de puissance est calculé en dollars par kilowatt ($/kW), en fonction du plus grand appel de puissance du mois. Par exemple, si la puissance maximale appelée pour un mois de facturation est de 150 kW et que le tarif est de 3$ par kW, la prime de puissance pour le mois sera de 450$. La prime de puissance est habituellement calculée chaque mois selon la demande maximale de ce mois et peut représenter la plus grande partie d'une facture d'électricité. Se référer au Module 3 intitulé «Électricité.»
- *Délestage* – Cette technique consiste à couper manuellement ou automatiquement, selon un ordre prioritaire, l'alimentation de certains équipements électriques, lorsque l'appel de puissance électrique atteint un seuil déterminé, pour diminuer les charges de pointe de l'installation. Pour de plus amples renseignements, se référer au Module 3 intitulé «Électricité.»
- *Profils de charge* – Diagramme ou graphique, sur lequel la charge est tracée en fonction du temps, très utile dans l'évaluation des possibilités d'accumulation thermique. La figure 1 montre un *profil de charge de refroidissement* type représentant les besoins en refroidissement à différents moments de la journée. D'autres courbes peuvent être tracées pour illustrer les besoins en chauffage, en électricité, en gaz ou autres combustibles en fonction du temps. Ces courbes peuvent représenter la charge d'un seul système ou appareil ou de plusieurs systèmes (les charges sont alors superposées). La figure 2 montre les charges électriques de base et les charges de refroidissement d'une installation: la somme des deux charges correspond au profil de la charge totale. Les profils varient selon le taux d'occupation, la commutation du système d'éclairage et d'autres appareils électriques et les conditions extérieures.



Profil de charge de refroidissement type
Figure 1



Profil de charge électrique, système classique
Figure 2

Objectifs de l'accumulation thermique

L'accumulation thermique a pour objectif principal l'économie d'argent. On peut réaliser ces économies de plusieurs façons.

- On peut réduire la «consommation» énergétique en stockant de l'énergie thermique gaspillée ou excédentaire pour son utilisation ultérieure. L'emmagasinage de l'énergie solaire «gratuite» captée le jour pour réchauffer l'installation la nuit en est un exemple.
- On peut réduire la puissance électrique appelée en accumulant de l'énergie thermique pendant les périodes creuses pour satisfaire la demande aux périodes de pointe. On peut donner comme exemple un refroidisseur électrique chargeant un système de stockage d'eau glacée la nuit, pour réduire la puissance maximale appelée qui survient habituellement le jour.
- On peut différer l'achat d'équipements de chauffage ou de refroidissement additionnels et réduire la dimension de l'équipement dans les nouvelles installations en chargeant un système de stockage d'énergie lorsque les charges thermiques sont faibles et en prélevant l'énergie accumulée pour pallier les pointes de charges dépassant la capacité thermique de l'équipement.

Utilisation de l'énergie gaspillée ou excédentaire

Lorsque de l'énergie thermique est rejetée, il est recommandé d'étudier les façons de récupérer cette énergie pour une utilisation immédiate ou future. La température du flux thermique perdu influence toutefois la possibilité de récupérer la chaleur. Par exemple, on peut utiliser l'eau tiède rejetée à l'égout pour préchauffer l'eau d'appoint d'un procédé, mais non pour chauffer une pièce.

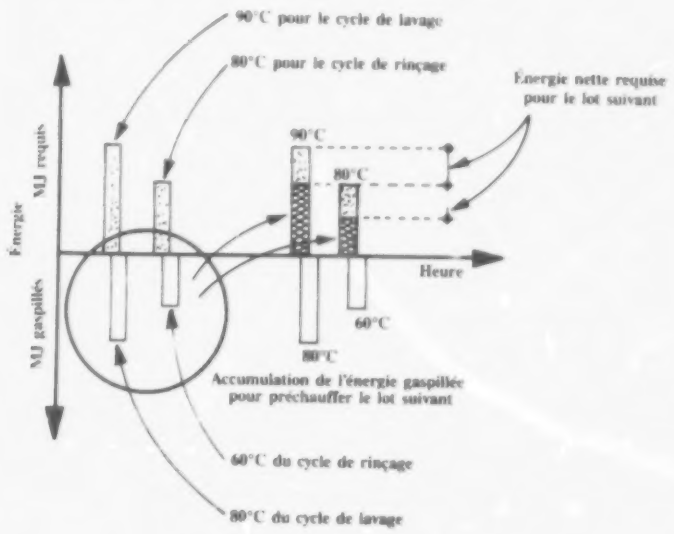
Il existe plusieurs sources d'approvisionnement en énergie.

- L'eau chaude ou froide évacuée à l'égout.
- Les gaz de combustion.
- Les gaz d'échappement.
- Les produits ou rebuts chauds (ou froids) ou usés.
- La chaleur captée par des panneaux solaires.
- L'énergie thermique provenant du sol.
- La surchauffe et chaleur de condensation rejetée par l'équipement de réfrigération. Se référer au Module 11 intitulé «Refroidissement et pompes à chaleur»; les condenseurs refroidis à l'eau offrent souvent d'excellentes possibilités de diminuer les coûts de chauffage.
- Le froid produit par l'évaporateur d'un système de pompe à chaleur. Lorsqu'une pompe à chaleur fonctionne en mode de chauffage, elle extrait de la chaleur au niveau de l'évaporateur. Le refroidissement qui en résulte peut être emmagasiné pour refroidir un procédé ou une installation.

On peut utiliser l'énergie gaspillée dans des procédés *continus* pour chauffer ou refroidir directement des produits ou des procédés. Dans les procédés *en lots*, il faut par contre, mettre l'énergie thermique gaspillée ou excédentaire en réserve jusqu'au moment de son utilisation. On peut également augmenter la quantité d'énergie à l'aide des pompes à chaleur.

Par exemple, l'eau chaude utilisée dans une usine de textiles pour les procédés de lavage et de rinçage est évacuée à l'égout après chaque cycle (figure 3). On peut réaliser des économies en installant un réservoir distinct pour le stockage de l'eau chaude usée des cycles de lavage et de rinçage jusqu'au moment de son utilisation directe ou pour préchauffer l'eau d'appoint du cycle suivant du procédé. Les coûts énergétiques sont ainsi réduits puisque l'installation consomme moins d'énergie pour chauffer l'eau de lavage et de rinçage. Ce principe s'applique à plusieurs systèmes de *récupération de chaleur.*

Les systèmes de chauffage solaire nécessitent une accumulation thermique pour emmagisiner de l'énergie solaire «gratuite», sous forme de chaleur jusqu'au moment de son utilisation.



Exemple d'un procédé par lots
Figure 3

Réduction de la prime de puissance

L'objectif principal de la plupart des systèmes de stockage d'énergie est de réduire la puissance maximale appelée et par conséquent, diminuer la prime de puissance électrique (frais). Pour y arriver, il faut couper ou limiter l'alimentation électrique de certains appareils de chauffage ou de refroidissement pendant les périodes de pointe d'une installation (délestage). Les appareils fonctionnent avant la période de pointe (par exemple la nuit) pour charger les systèmes de stockage d'énergie. Pendant la période de pointe, l'équipement de chauffage et de refroidissement est hors tension et la chaleur ou le froid en réserve satisfait la demande. Le fonctionnement d'autres équipements électriques devrait également être limité, même si on ne peut en accumuler l'énergie (ex. l'éclairage).

Si une installation possède un profil de charge électrique comprenant d'importantes pointes de charge, on devrait sérieusement examiner la possibilité de stocker de l'énergie. Des profils de charges électriques et thermiques devraient être tracés pour évaluer la possibilité de réduire la prime de puissance électrique. Dans la figure 2, la charge de pointe de l'installation est survenue lorsque la capacité du refroidisseur a atteint son maximum en fin d'après-midi. Si le refroidisseur pouvait fonctionner comme dans la figure 4, la puissance maximale appelée serait réduite de 125 kW. Les courbes de charge thermique du refroidisseur de la figure 5 démontrent l'avantage de stocker de l'énergie thermique pendant les heures creuses pour satisfaire la demande pendant les heures de travail. Les figures montrent également que le refroidisseur peut fonctionner pendant les heures de travail et réduire quand même les charges de pointe de l'ensemble de l'installation.

On peut couper l'alimentation électrique de l'équipement de chauffage ou de refroidissement ou installer un limiteur de puissance pour réduire la puissance appelée pendant les périodes de pointe. Plusieurs types d'équipements peuvent être mis sous et hors tension en fonction des systèmes de stockage d'énergie:

- Les systèmes de chauffage et de refroidissement du bâtiment.
- Les systèmes de chauffage d'eau potable.
- Les systèmes de chauffage et de refroidissement des procédés.
- Les systèmes de réfrigération.
- Les systèmes de fonte de la neige.
- Les systèmes de séchage.
- Les systèmes de production de glace.

Contrairement aux régions où le coût de l'électricité est élevé, les primes de puissance peu élévées et les taux de consommation fixes dans la plupart des régions du Canada n'encouragent pas le stockage d'énergie. Plusieurs fournisseurs d'énergie canadiens ont mis sur pied des projets pilotes pour étudier l'avantage d'une échelle de tarifs établie en fonction du moment de la journée. Selon ce système, le coût de la consommation, la prime de puissance ou les deux, varieraient selon l'heure de jour. L'électricité coûterait plus cher durant la *période de pointe du fournisseur* et moins cher la nuit ou les fins de semaine. La mise en application de ce système augmenterait sans aucun doute les possibilités d'accumulation thermique. En outre, il y aurait peut-être possibilité de négocier un taux inférieur avec la compagnie s'électricité pour utiliser l'énergie hors pointe.

Différer l'achat d'équipements

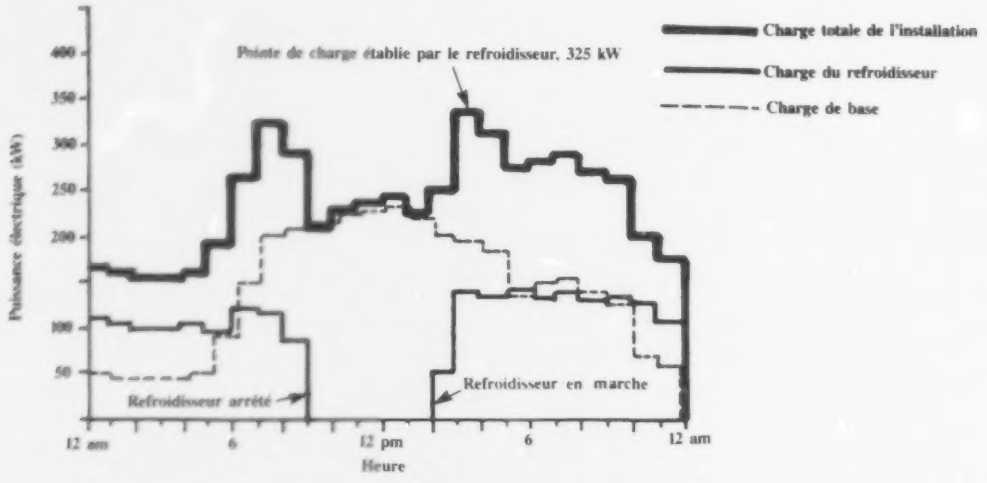
On choisit habituellement la capacité de l'équipement de chauffage et de refroidissement en fonction de la charge de conception alors que les besoins en chauffage ou en refroidissement approchent une valeur maximale. Comme il s'agit de charges de courte durée, la capacité de l'équipement est souvent surdimensionnée par rapport à la demande moyenne. L'énergie que représente la différence entre les charges thermiques moyenne et de pointe, combinée au stockage d'énergie possible, est suffisamment importante pour différer l'achat d'équipements en vue de moderniser une installation ou pour réduire la dimension de l'équipement d'une nouvelle installation.

Prenons par exemple un bâtiment dont les charges de refroidissement moyenne et de pointe sont de 500 et 650 kW respectivement. La capacité du refroidisseur existant est de 750 kW. L'agrandissement proposé des lieux élèverait la charge de refroidissement moyenne à 700 kW, et celle de pointe à 850 kW. L'équipement existant pourrait satisfaire la demande de la nouvelle charge moyenne mais non à celle de pointe. Selon l'approche classique, l'installation nécessiterait un nouveau refroidisseur d'une capacité de 100 kW.

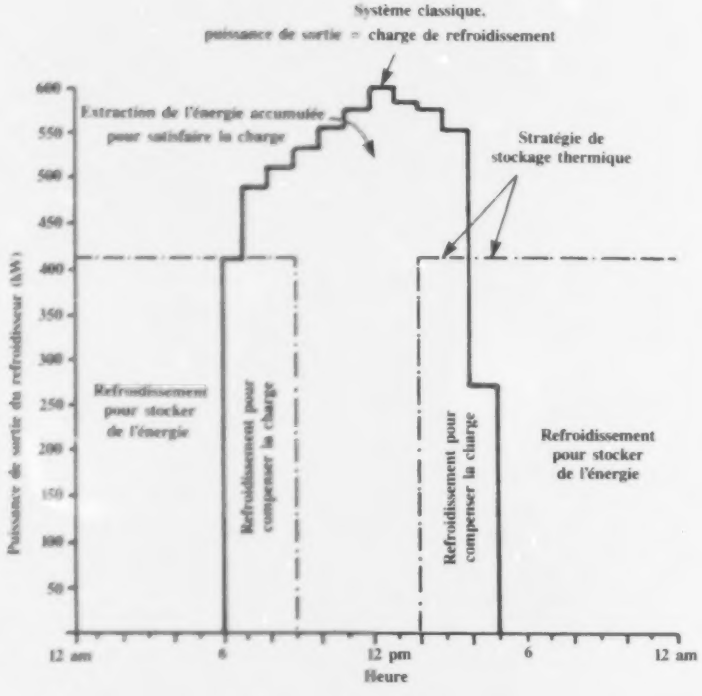
Au lieu d'acheter un nouveau refroidisseur, un système de stockage d'énergie pourrait satisfaire la demande de la charge de refroidissement de pointe. Pendant les heures creuses, alors que la charge thermique exige peu du refroidisseur existant, ce dernier fonctionnerait pour maintenir les conditions ambiantes ou de procédés et sa capacité excédentaire serait utilisée pour charger le système de stockage d'eau glacée. Lorsque le refroidisseur ne pourrait plus suffire à la demande de la charge de refroidissement, le système fournirait l'eau glacée accumulée.

Les avantages représentent des économies de mise de fonds et une réduction des coûts d'exploitation. En effet, ces derniers sont réduits parce que les charges de pointe sont limitées pour ne fournir que l'énergie nécessaire à 750 kW de refroidissement au lieu de 850, et parce qu'il y a moins d'équipement à entretenir. La consommation électrique annuelle de refroidissement augmenterait et serait proportionnelle aux nouvelles charges de refroidissement.

Cette technique est également appliquée dans les nouvelles installations où la capacité de l'équipement thermique est choisie selon les conditions moyennes au lieu des conditions de pointe.



Fonctionnement révisé du refroidisseur
Figure 4



Profil de charge thermique (puissance de sortie du refroidisseur)
Figure 5

Chaleur sensible et chaleur latente

Lorsque de l'énergie thermique est ajoutée à une substance ou en est extraite, il y a variation de température de la substance ou cette dernière change d'*état*.

Lorsque l'énergie thermique est associée à une variation de température, on parle de *chaleur sensible*. La quantité d'énergie est fonction de la variation de température, de la quantité de substance et de la *chaleur spécifique* de la substance exprimée en kJ/(kg.°C).

Lorsque l'énergie thermique est associée à un changement d'état (ou de phase) on parle de *chaleur latente*. Lorsque la substance passe de l'état gazeux à l'état liquide (vapeur à eau par exemple), il y a extraction de *chaleur latente de condensation*. La chaleur latente de condensation est généralement fonction des propriétés, de la température et de la pression de la substance. Lorsque la substance passe de l'état liquide à l'état solide (eau à glace par exemple), il y a extraction de *chaleur latente de fusion*. La chaleur de fusion dépend des propriétés et de la température de la substance et est, à toute fin pratique, indépendante de la pression. Les deux valeurs s'expriment en kJ/kg. Dans la plupart des systèmes de stockage d'énergie, l'énergie thermique est stockée sous forme de *chaleur sensible* ou de *chaleur latente de fusion*.

On accumule de la chaleur sensible en augmentant (ou en abaissant) la température du milieu thermique. Un thermos d'eau chaude est un exemple simple. L'eau chauffée à température élevée accumulera plus d'énergie thermique que si elle est chauffée à basse température.

Un bloc de glace est un exemple d'accumulation thermique basé sur un changement d'état. On extrait de la chaleur de l'eau jusqu'au point de congélation. Plus tard, à mesure que fond la glace, la chaleur est absorbée par celle-ci et on refroidit l'environnement.

Les systèmes d'accumulation thermique avec changement d'état sont plus compacts que les sytèmes de stockage de chaleur sensible et accumulent généralement environ 10 fois plus d'énergie par unité de volume. Par exemple, la congélation d'un kilogramme d'eau stocke environ 334 kJ de froid sous forme de glace à 0°C. La fusion de la glace extrait les 334 kJ de l'environnement. Il faudrait refroidir environ 10 kg d'eau de 5°C pour accumuler la même quantité d'énergie thermique.

Calculs de base

Il faut effectuer certains calculs pour faire une première évaluation des possibilités de stockage thermique pour une installation.

Calculs relatifs à l'accumulation de chaleur sensible

La quantité de chaleur pouvant être accumulée dans un liquide ou un solide par élévation de température peut être calculée par l'équation suivante.

$$E = \frac{M \times cp \times DT}{1\,000}$$

où, E = énergie thermique accumulée (MJ)

M = masse du milieu thermique (kg)

cp = chaleur spécifique à la température moyenne [(kJ/(kg.°C]

DT = variation de température du milieu thermique (°C).

1 000 = conversion de kJ à MJ

On peut calculer le volume du milieu thermique nécessaire pour contenir une quantité donnée d'énergie thermique.

$$V = \frac{M}{d}$$

où, V = volume (m^3)

d = masse volumique (kg/m^3).

Le volume peut également s'exprimer par l'équation suivante:

$$V = \frac{E \times 1000}{d \times cp \times DT}$$

On retrouve la liste des valeurs de la chaleur spécifique et de la masse volumique d'un certain nombre de substances courantes dans la table 1.

On peut également calculer le volume d'un milieu thermique pour une accumulation thermique donnée à l'aide des données de la table 2.

La méthode empirique est la meilleure façon de déterminer les possibilités d'accumulation thermique d'une installation. Règle générale, la quantité d'énergie pouvant être accumulée dans un espace industriel type dont la variation de température est de 3°C, est d'environ 0,370 MJ/m^2. Dans un espace de bureaux dont la variation de température est de 2°C, on peut accumuler environ 0,250 MJ/m^2.

On peut modifier l'équation $E = \frac{M \times cp \times DT}{1000}$ pour le stockage de la chaleur sensible:

E = 0,370 x A (espace industriel type) ou

E = 0,250 x A (espace de bureaux type)

où, E = énergie thermique accumulée (MJ)

A = surface du bâtiment ou de plancher (m^2)

Il faut noter que seule la couche superficielle d'une dalle de béton échange activement ou accumulera de la chaleur lors des cycles journaliers. Même des dalles épaisses ne peuvent stocker beaucoup de chaleur, à cause des cycles trop courts.

Calculs relatifs à l'accumulation thermique avec changement d'état.

Lorsqu'on examine les possibilités d'accumulation thermique avec changement d'état, le volume approximatif du milieu thermique s'obtient à partir de la table 2 ou par des calculs.

E = M x (chaleur latente de fusion)

où, E = énergie thermique accumulée (MJ)

M = masse du milieu thermique à phase changeante (kg).

Chaleur latente de fusion = quantité de chaleur requise pour la fusion ou la congélation de la substance (kJ/kg)

$$\text{où, } M = \frac{E \times 1000}{\text{Chaleur latente de fusion}}$$

Autres facteurs

La rentabilité d'un système de stockage d'énergie est fonction d'autres facteurs, soit:

- La consommation énergétique des systèmes de chauffage, de refroidissement et de pompes à chaleur.
- Les limites du système de stockage d'énergie.
- Les profils de charge thermique.
- L'optimisation des systèmes classiques.

Consommation énergétique des systèmes de chauffage, de refroidissement et de pompes à chaleur

L'*électricité* se convertit en énergie thermique par le biais de résistances électriques ou de dispositifs mécaniques. Dans les systèmes de chauffage par résistance, chaque kWh d'électricité est convertit en un kWh (3,60 MJ) de chaleur, et on obtient un rendement de conversion de 100%. Les plinthes de chauffage électrique, les chauffe-eau électriques et les systèmes de chauffage des dalles en sont des exemples types.

Lorsqu'on utilise des systèmes de refroidissement et (ou) des pompes à chaleur pour produire du chauffage et (ou) du refroidissement, le rendement de conversion ou le coefficient de performance (COP) est supérieur à 100%. Toutefois un rejet thermique est nécessaire pour obtenir ce résultat. (Se référer au Module II intitulé «Réfrigération et pompes à chaleur»). Le COP des systèmes types est d'environ 3,5 et chaque kWh d'alimentation électrique de l'équipement produit environ 3,5 kWh de chauffage ou de refroidissement. L'alimentation électrique d'un système de refroidissement générant du chauffage ou du refroidissement à un taux de 350 kW est de 100 kW, obtenue en divisant 350 par 3,5 (COP). Il s'agit d'un facteur important lorsqu'on étudie la possibilité d'installer un système de stockage d'énergie pour réduire la puissance appelée. Si le pouvoir calorifique du flux thermique perdu est élevé et qu'il y a une demande de chauffage ailleurs dans le bâtiment, des échangeurs de chaleur peuvent être installés pour transférer la chaleur et augmenter le COP du système, ce qui réalise des économies d'énergie.

Lorsqu'on envisage la conversion d'un système existant en un système de stockage d'énergie, il faut obtenir le COP réel de l'équipement auprès du fournisseur. Lorsqu'il est impossible d'obtenir cette information, on peut déterminer la consommation énergétique des systèmes de pompe à chaleur et de refroidissement en considérant un COP de 3,5. Les systèmes ayant un COP entre 10 et 20 existent mais ne sont pas courants.

La consommation énergétique par unité de capacité d'un système de *refroidissement* augmente en fonction de l'abaissement de la température du côté froid (évaporateur) et l'élévation de la température du côté chaud (condenseur). Ainsi, la production de glace à 0°C demande plus d'énergie que la production d'eau glacée à 4°C. Inversement, la production d'eau chaude à 50°C nécessite plus de puissance de refroidissement qu'à 35°C. On ne tient pas compte de ces effets dans le présent module, parce que l'écart est habituellement inférieur à 3% lorsque le COP approche 3,5.

Limites du système de stockage d'énergie

Il existe plusieurs types de systèmes de stockage d'énergie selon leur capacité d'accumuler de l'énergie pour quelques heures ou à long terme. Le stockage de l'énergie solaire pendant l'été pour le chauffage de l'installation en hiver est un exemple d'accumulation à long terme. Un certain nombre de restrictions pratiques limitent normalement le stockage à quelques heures ou à un maximum de quelques jours. Les principales restrictions sont le manque d'espace et la mise de fonds.

Prenons par exemple un bâtiment ou un procédé exigeant 1 000 kW de refroidissement fonctionnant à pleine capacité durant 900 heures. L'énergie de refroidissement annuelle minimale devant être emmagasinée est de 900 x 1 000 = 900 000 kWh. Si la glace est utilisée comme milieu thermique, il faut selon la table 2, environ 3 litres de glace (environ 3 kg) pour stocker 1 mégajoule de froid.

$$\text{Glace requise} = 3\ \text{L/MJ} \times 900\,000\ \text{kWh} \times 3{,}6\ \text{MJ/kWh}$$

$$= 9\,720\,000\ \text{litres}$$

$$\text{ou} = \frac{9{,}72 \times 10^6\ \text{L}}{1\,000\ \text{L/m}^3}$$

$$= 9\,720\ \text{m}^3$$

En supposant des «réservoirs parfaits» sans *perte de chaleur* ni «marge de sécurité», un réservoir de deux mètres de profondeur couvrirait une surface des dimensions d'un terrain de football. Un système de stockage d'eau représenterait une surface au moins 10 fois plus grande. Les coûts de ces systèmes sont inabordables. En raison des pertes d'énergie, de l'impossibilité d'utiliser toute l'énergie thermique accumulée et de la nécessité d'assurer une certaine marge de sécurité, le plus petit système peut être 25% plus grand que les volumes de la table 2.

Profils de charge thermique

Lorsque les charges thermiques varient, il y a possibilité d'accumulation thermique pour satisfaire une demande ultérieure.

Les profils de charge de plusieurs bâtiments et installations favorisent l'accumulation thermique. Les bâtiments administratifs dont la demande en refroidissement est faible la nuit et le matin et élevée en fin d'après-midi présentent les meilleures possibilités de stockage d'énergie. Les systèmes de conditionnement d'air de ces bâtiments sont souvent arrêtés la nuit. Les charges partielles diurnes combinées à l'arrêt des systèmes la nuit représentent 15 à 20 heures quotidiennement durant lesquelles un système de stockage d'eau glacée pourrait être chargé pour satisfaire la demande au moment des pointes.

Les hôtels, les hôpitaux et les usines fonctionnant 24 heures sur 24 ne présentent pas d'aussi bonnes possibilités d'accumulation thermique car leurs profils de charge sont plus linéaires. Il y a moins de temps pour charger le système entre les longues périodes de pointe de refroidissement. Toutefois, ces installations se prêtent bien aux systèmes d'accumulation thermique partiels et limiteurs de pointe. Par exemple, un refroidiseur peut satisfaire la demande de la charge thermique de base et les pointes peuvent être réduites en combinant le refroidisseur et un système de stockage d'énergie. Dans ce cas, le refroidisseur demanderait moins de puissance électrique. On peut maximiser l'investissement en choisissant l'équipement avec soin et en utilisant la chaleur du compresseur pour préchauffer l'eau chaude domestique ou de procédé.

Le climat affecte le profil de charge thermique d'un bâtiment et devient un facteur important lorsqu'il s'agit de déterminer la rentabilité du système de stockage d'énergie. Pour que le stockage du froid soit rentable, le profil d'été doit inclure un nombre limité de jours de pointe et, si possible, de grandes variations de température sur une période de 24 heures. Pour que le stockage de la chaleur soit rentable, on exige habituellement un minimum de 2 200 *degrés-jour au-dessous de 18°C*. La plupart des régions du Canada répondent à ces exigences.

Optimisation des systèmes classiques

Les systèmes de chauffage et de refroidissement existants devraient être modernisés et bien entretenus pour réduire les inefficacités avant de considérer l'installation d'un système de stockage d'énergie. Lorsqu'on examine un système classique, il faut étudier la possibilité de récupérer l'énergie rejetée ou gaspillée, par exemple l'énergie contenue dans les gaz de combustion d'une chaudière.

On pourrait aussi envisager la possibilité de convertir les procédés par lots en procédés continus pour utiliser directement la chaleur récupérée sans stockage intermédiaire. On obtient alors une plus grande récupération de chaleur sans perte de chaleur de réserve tout en économisant sur la mise de fonds.

Analyse énergétique

Il existe un certain nombre de Possibilités de gestion de l'énergie utilisant les concepts de l'accumulation thermique dans les installations industrielles, les bâtiments commerciaux et les immeubles de caractère public. Plusieurs de ces possibilités peuvent être identifiées lors d'une *analyse au passage* de l'installation. Il est souvent plus avantageux d'affecter à cette tâche une personne de l'extérieur spécialiste en gestion de l'énergie. Toutefois, ce type d'analyse identifierait probablement des possibilités reliées à l'état et au fonctionnement du système de chauffage et de refroidissement existant. Il faut effectuer une analyse détaillée pour déterminer s'il y a possibilité d'installer un système de stockage d'énergie.

Les questions suivantes peuvent être analysées pour évaluer la viabilité d'un tel système.

- Quelle est la puissance appelée et les frais de consommation électrique de l'installation?
- Le profil de puissance demandée comporte-t-il des pointes?
- La prime de puissance constitue-t-elle la majeure partie de la facture d'électricité?
- L'équipement de chauffage ou de refroidissement électrique fonctionne-t-il pendant la période de pointe? Peut-il être arrêté?
- Gaspille-t-on de l'énergie thermique?
- Certains procédés ou produits demandent-ils du refroidissement alors que d'autres demandent du chauffage à des moments différents?

On accumule ces données pour effectuer une *analyse de diagnostic* et déterminer, à l'aide de calculs, les conditions d'exploitation existantes, les possibilités de réduction énergétique et les économies d'argent. Après avoir déterminé l'investissement, on peut effectuer des calculs pour déterminer la rentabilité du projet.

Les possibilités de gestion de l'énergie se divisent en trois catégories.

- *Les possibilités de maintenance* sont des initiatives de gestion de l'énergie exécutées *de façon périodique, au moins une fois par année.* La réparation des fuites et les programmes d'entretien préventif pour éviter la détérioration des systèmes existants en sont des exemples.
- Les *possibilités d'amélioration de coût modique* sont des initiatives de gestion de l'énergie *réalisées en une seule fois et dont le coût n'est pas élevé.* La révision des programmes de fonctionnement, l'utilisation de réservoirs de stockage existants pour stocker l'énergie, la modification des appareils de commandes pour permettre un préchauffage ou un prérefroidissement suivi d'un délestage, et l'installation de réservoirs pour récupérer l'eau chaude usée en sont des exemples.
- Les *possibilités de rénovation* sont des initiatives de gestion de l'énergie *réalisées en une seule fois et dont le coût est important.* L'installation de systèmes de fabrication de glace et de trémies accumulant l'énergie de refroidissement ou de systèmes de stockage d'eau chaude/glacée combinés à un refroidisseur à récupération de chaleur en sont des exemples.

Il faut noter que les différences entre les Possibilités de coût modique et de rénovation sont habituellement fonction de l'importance, du type et de la politique financière de l'entreprise.

Résumé

On peut réaliser de grandes économies d'énergie et d'argent en tirant avantage du stockage d'énergie thermique lorsque les techniques suivantes peuvent être appliquées.

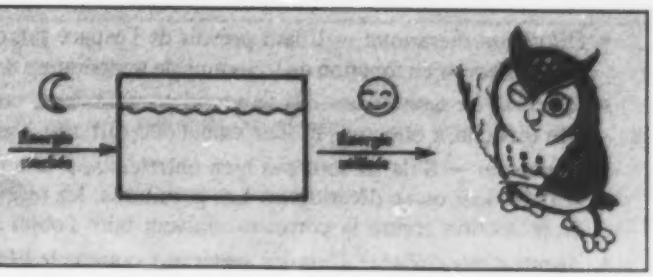
- *Utiliser la chaleur excédentaire ou l'énergie gaspillée* en accumulant l'énergie thermique qui n'a pas d'utilisation immédiate. Plus tard, lorsqu'il y a une demande en chauffage ou en refroidissement, prélever l'énergie accumulée pour réduire la consommation énergétique de l'installation.
- *Réduire la prime de puissance électrique* en faisant fonctionner certains équipements électriques pendant les périodes creuses pour charger un système de stockage d'énergie. Cette énergie thermique accumulée est alors utilisée pendant les périodes de pointe pour réduire les charges de pointe.
- *Éviter l'achat d'équipements de chauffage ou de refroidissement* en puisant l'énergie de chauffage ou de refroidissement supplémentaire de la réserve d'énergie accumulée pour satisfaire les charges de pointe de l'installation ou du procédé. Faire fonctionner le système de chauffage ou de refroidissement existant pour charger le système de stockage d'énergie pendant les périodes creuses.

Plusieurs paramètres influencent la viabilité d'un projet d'accumulation thermique:

- Les charges thermiques de l'installation.
- Les profils de charges électriques et thermiques.
- La disponibilité de l'énergie thermique perdue ou excédentaire.
- La facture d'électricité et la prime de puissance.
- Le type d'équipement générateur d'énergie thermique.
- Le type et le taux d'occupation de l'installation.

Lorsqu'on envisage l'installation d'un système de stockage d'énergie plus complexe, tel que détaillé plus loin dans le module, les possibilités de stockage d'énergie doivent être évaluées par un spécialiste.

APPAREILLAGE



Les composants les plus communs des systèmes de stockage d'énergie (pompes, tuyauterie, vannes de réglage, refroidisseurs) sont traités dans d'autres modules de la série. Seuls les milieux thermiques, les réservoirs et l'équipement solidaire de ces systèmes, ainsi que quelques systèmes caractéristiques des grandes installations d'accumulation thermique sont brièvement décrits dans le présent module.

Milieux thermiques

Le principe de base des milieux d'accumulation de chaleur sensible et de chaleur latente de fusion a été exposé dans les Notions de base. Les tables 1 et 2 donnent la liste des principales caractéristiques des matériaux de construction et des milieux thermiques les plus courants.

Le milieu thermique doit être choisi en fonction d'un certain nombre de facteurs.

- *Volume* – Quel est l'espace disponible pour stocker l'énergie?
- *Température* – À quelle échelle de température de service doit fonctionner le système? Sera-t-il utilisé pour le chauffage, le refroidissement ou les deux?
- *Durée de vie* – L'usage répétitif et la contamination peuvent-ils réduire l'efficacité du milieu thermique?
- *Perte d'énergie* – Peut-il y avoir perte d'énergie accumulée à cause des propriétés du milieu thermique?

L'eau, qui peut être utilisée autant pour le chauffage que pour le refroidissement, est le milieu d'accumulation de chaleur sensible le plus pratique en raison de son coût peu élevé, de sa grande capacité de stockage thermique, de sa non toxicité, de sa longue durée de vie et de sa facilité de manutention.

Lorsque l'eau est utilisée comme milieu à changement d'état, elle est idéale pour les mêmes raisons. Les systèmes de fabrication de glace accumulent principalement la chaleur latente; en effet, l'accumulation de la chaleur sensible durant les phases solides et liquides ne comptent que pour une fraction de la capacité totale.

Il existe d'autres substances à changement d'état mais la toxicité, le coût, la capacité de stockage et les pertes d'énergie du milieu thermique doivent être examinés attentivement au préalable. Par exemple, le sel de Glauber se détériore avec l'âge et perd sa capacité de stocker de l'énergie.

Les milieux thermiques solides accumulant de la chaleur sensible sont très courants. L'utilisation de la masse thermique d'un bâtiment ou d'un produit pour le préchauffage ou le prérefroidissement de ces derniers en est un exemple. La chaleur sensible est stockée pour une courte durée afin d'arrêter l'équipement électrique et de réduire la puissance appelée. L'utilisation de la dalle de plancher d'une serre ou d'un solarium pour accumuler la chaleur solaire le jour et la distribuer le soir en est un autre exemple.

Accumulation de chaleur sensible

Les milieux thermiques liquides et solides peuvent être utilisés dans les systèmes d'accumulation de chaleur sensible.

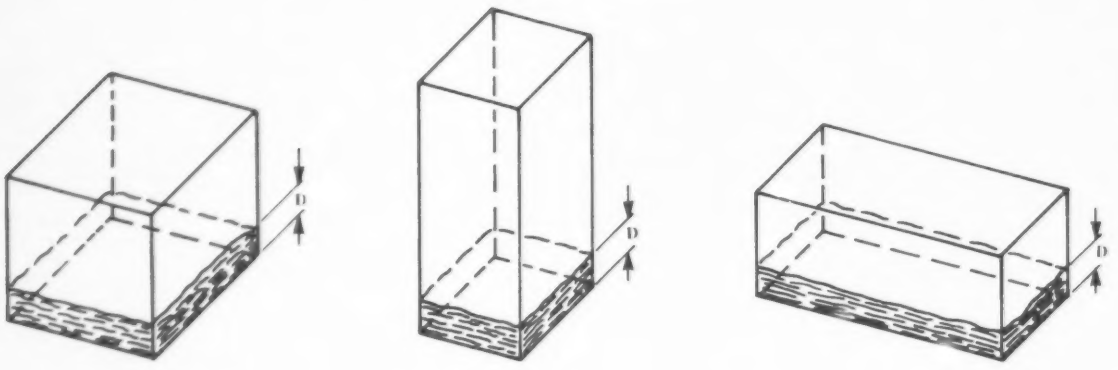
Milieux liquides

Un liquide servant à l'accumulation de la chaleur sensible doit être emmagasiné dans des réservoirs. Plusieurs modèles de réservoirs sont offerts sur le marché et les réservoirs classiques peuvent être utilisés s'ils sont bien entretenus. Les matériaux les plus courants sont l'acier, le béton et le fibre de verre.

Le choix d'un réservoir est fonction de plusieurs facteurs.

- *Emplacement et dimensions* – Est-ce que le réservoir doit être installé sur le sol, enfoui dans un sous-sol, un garage de stationnement ou à l'étage supérieur d'un bâtiment? Les dimensions et les spécifications de pompage sont des facteurs prépondérants à la prise de décision.
- *Nouvelle installation ou installation existante* – Si les réservoirs doivent être installés dans des installations existantes, peuvent-ils être préfabriqués ou doivent-ils être montés sur les lieux?

- *Dilatation thermique* – Il faut prévoir de l'espace pour la dilatation et la contraction du milieu thermique et du réservoir en fonction de la gamme de température de service.
- *Raccords de tuyauterie* – Si un grand nombre de raccords doivent être submergés, leur installation sera-t-elle difficile à effectuer et leur étanchéité difficile à assurer?
- *Corrosion* – S'ils ne sont pas bien entretenus, à la longue, les réservoirs en acier ou en d'autres métaux se corrodent ou se détériorent. Les garnitures, les revêtements, le traitement chimique et tout autre moyen de protection contre la corrosion doivent faire l'objet d'un examen attentif.
- *Agents d'étanchéité* – Certains matériaux comme le béton sont poreux et nécessitent de bons agents d'étanchéité. Les propriétés des garnitures et des revêtements doivent être compatibles avec celles des autres matériaux du système.
- *Température de service* – Certains matériaux de fabrication des garnitures, les agents d'étanchéité et d'autres composants ne tolèrent pas certaines températures quoique la plupart des matériaux se prêtent bien aux applications à l'eau refroidie et chauffée, d'autres doivent être choisis pour leur résistance à la chaleur et au froid extrêmes.
- *Forme du réservoir* – La forme du réservoir influence les coûts et le rendement des systèmes de stockage d'énergie. Les réservoirs «cubiques» sont en général moins chers que les réservoirs «rectangulaires», par contre les réservoirs rectangulaires de type «vertical» peuvent être plus efficaces (figure 6). Les réservoirs standard sont toujours moins chers que ceux fabriqués sur mesure.
- *Réservoirs usagés* – Il est possible d'acheter des réservoirs usagés ou d'utiliser des réservoirs disponibles sur place. Les réservoirs doivent être nettoyés pour éviter toute contamination du milieu thermique.



- Coût le plus faible
- Pertes de réserve les plus faibles
- Volume acceptable du fluide inutilisable

(A)

- Coût similaire à (C)
- Pertes de réserve supérieures à (A)
- Volume inutilisable le plus bas

(B)

- Coût similaire à (B)
- Pertes de réserve les plus élevées
- Volume inutilisable le plus élevé

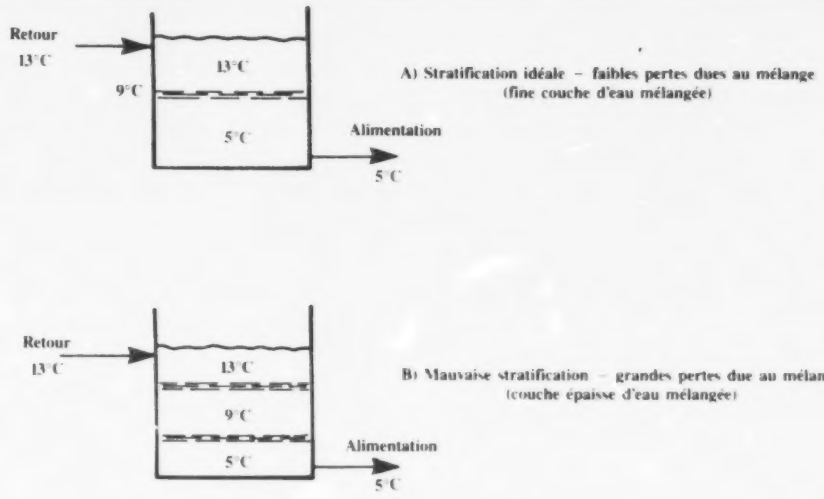
(C)

NOTE: La profondeur inutilisable (D) est identique dans tous les réservoirs.

Formes de réservoir
Figure 6

Mélange et perte de chaleur dans un milieu liquide

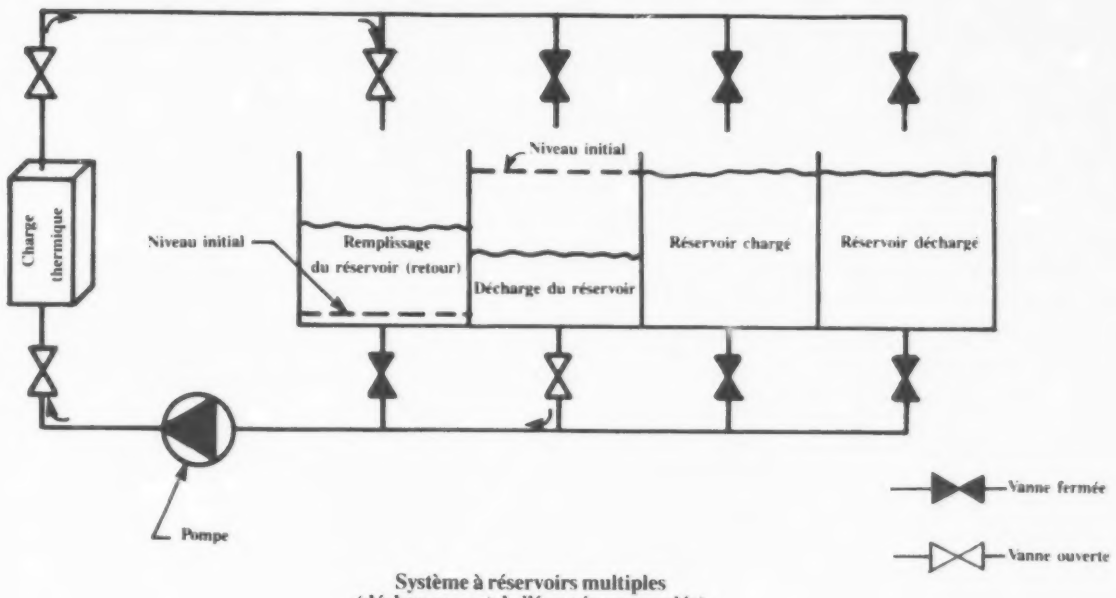
On peut augmenter la capacité d'accumulation thermique d'un réservoir en installant des dispositifs qui empêchent le débit de retour de se mélanger avec le fluide dans le réservoir. S'il y a mélange, la température du milieu thermique peut ne pas être appropriée pour l'application. Prenons par exemple un réservoir d'eau glacée rempli en parties égales d'eau d'alimentation de 5°C et d'eau de retour de 13°C provenant du système de refroidissement (figure 7). Si ces deux sources d'eau se mélangeaient, l'eau à 9°C qui en résulterait serait probablement trop chaude pour le conditionnement de l'air.



Stratification dans les réservoirs de stockage d'énergie
Figure 7

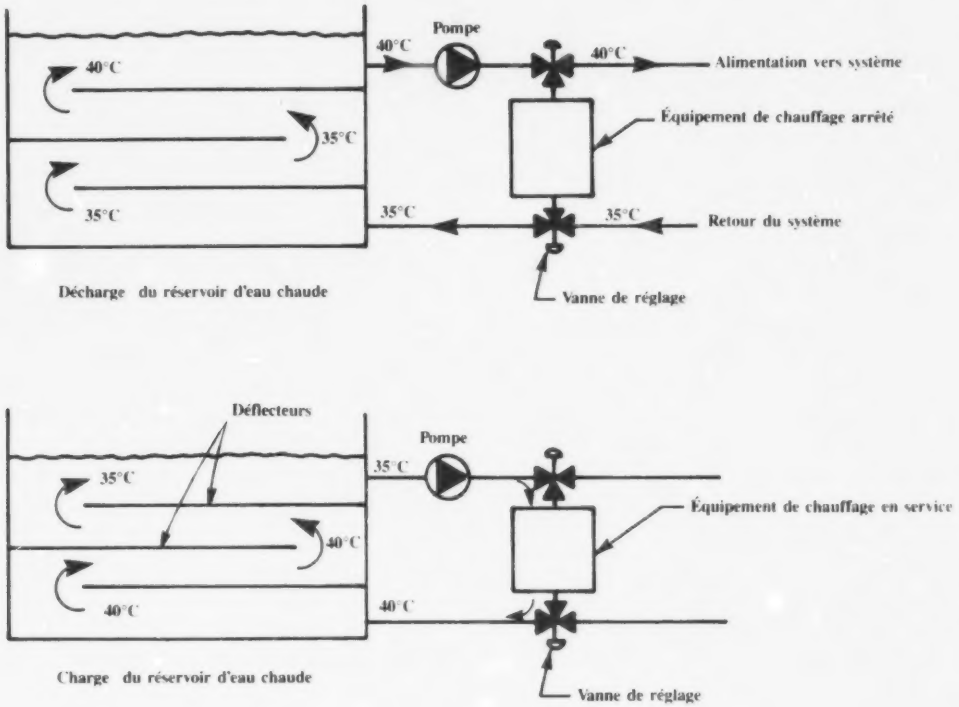
Il existe une variété de techniques qui empêchent les mélanges.

Des *réservoirs multiples* sont utilisés pour séparer l'eau d'alimentation de l'eau de retour (figure 8). Lorsque l'eau est pompée et distribuée, elle est retournée à un réservoir vide pour éviter tout mélange. Quoique cette méthode soit simple et fiable, il y a encore des pertes parce qu'une certaine quantité d'eau doit demeurer dans le fond de chaque réservoir pour assurer la submersion de l'entrée de la pompe. On peut réduire ce volume d'eau en utilisant des réservoirs plus hauts et plus étroits ou en installant un drain au fond de chaque réservoir. Le volume total à l'intérieur des réservoirs doit être augmenté pour tenir compte d'un réservoir vide.



Système à réservoirs multiples
(déchargement de l'énergie accumulée)
Figure 8

Des *déflecteurs* installés dans un réservoir dirigent le débit d'eau à travers un système de canalisations (figure 9). Puisque les déflecteurs transforment le réservoir en un long tuyau, les interfaces entre l'eau de retour et l'eau d'alimentation sont réduites au minimum. Cette figure montre également comment un réservoir d'eau chaude muni de déflecteurs est chargé et déchargé. Lorsqu'il est déchargé, l'eau à 35°C est introduite dans le fond du réservoir et déplace l'eau à 40°C pompée dans le système. Lorsqu'il est rechargé, l'eau à 35°C, provenant de la partie supérieure du réservoir, traverse un dispositif de chauffage pour augmenter la température de l'eau à 40°C avant de retourner au réservoir. Cette opération se poursuit jusqu'à ce que le réservoir soit complètement rempli d'eau chauffée à 40°C.

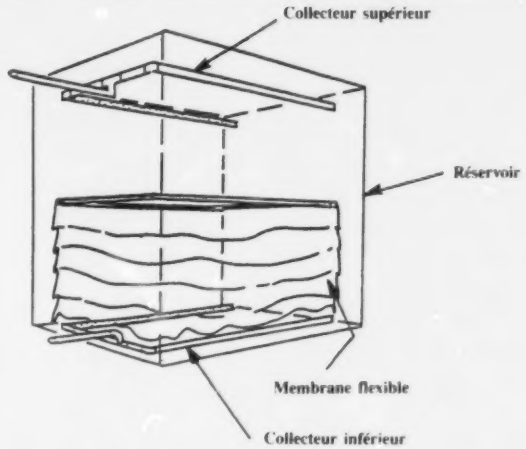


Réservoir muni de déflecteurs qui séparent les débits de retour et d'alimentation
Figure 9

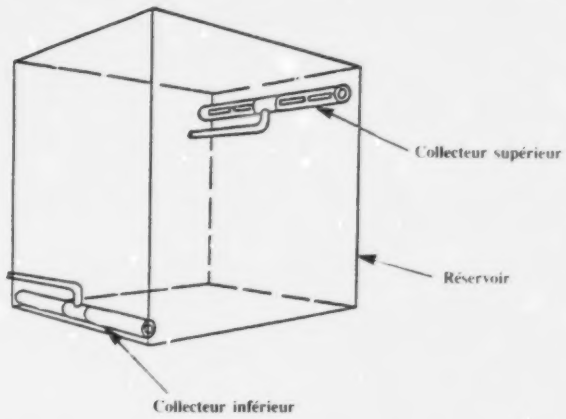
Une *membrane flexible* installée dans le réservoir sépare l'eau d'alimentation de l'eau de retour. La membrane se déplace de haut en bas à mesure que change le niveau d'eau de retour (figure 10). La membrane perd une très faible quantité de chaleur et toute possibilité de mélange est éliminée. Il faut toutefois éviter que la membrane ne soit aspirée par la pompe, et par conséquent soit endommagée, ou qu'elle endommage la pompe. Pour éviter cette situation, une petite quantité d'eau doit demeurer au fond du réservoir, ce qui gaspille une partie de l'énergie accumulée.

Des *collecteurs d'admission et de sortie uniformes* (figure 11) placés près du fond et dans la partie supérieure du réservoir assurent une stratification à l'intérieur même du milieu thermique. Une telle stratification est plus efficace lorsque l'eau est chaude plutôt que glacée à cause de la plus grande différence de température entre l'eau d'alimentation et l'eau de retour.

Les pertes ou les gains de chaleur diminuent la quantité d'énergie accumulée. La perte de chaleur du réservoir est fonction de la différence de température entre le contenu du réservoir et la température ambiante, du coefficient d'isolation des parois du réservoir et du temps. Les réservoirs en acier et en fibre de verre doivent être isolés pour contrôler les pertes de chaleur. Comme le coefficient de transmission de chaleur des réservoirs en béton est plus faible, il est possible que ceux-ci ne requièrent aucune isolation. Chaque cas doit faire l'objet d'une analyse pour déterminer l'épaisseur d'isolant la plus économique. Se référer au Module 1 intitulé «Isolation thermique des équipements».



Réservoir stratifié muni d'une membrane flexible
Figure 10



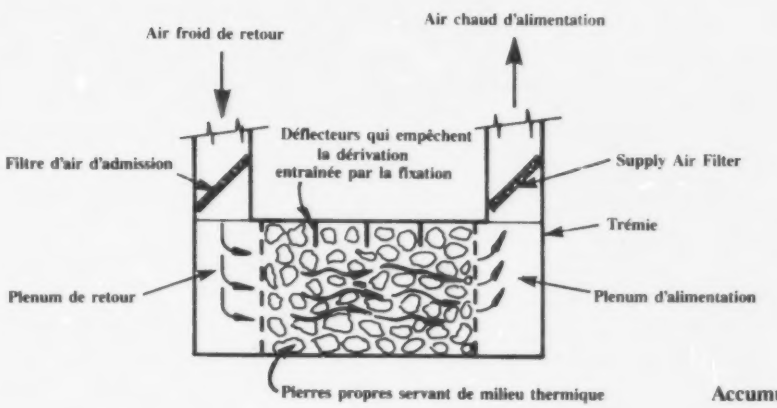
Reservoir «naturellement» stratifié muni de collecteurs de distribution
Figure 11

Milieu solide

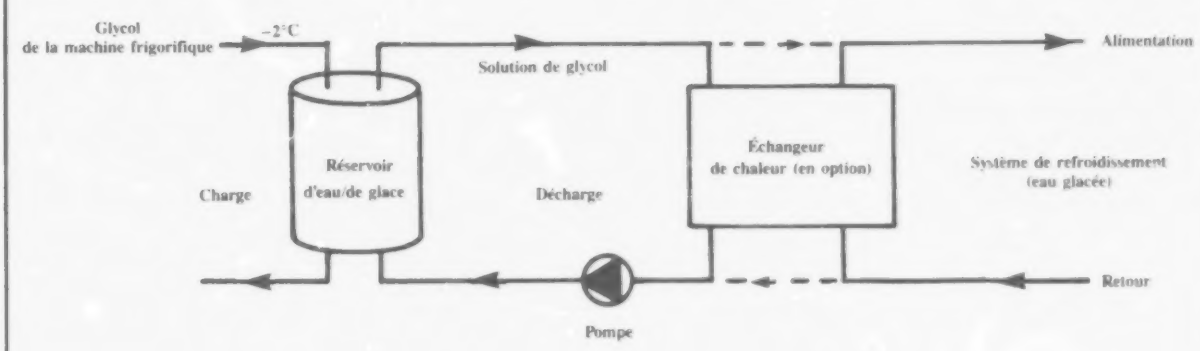
Les lits de pierres et la charpente d'un bâtiment sont des exemples de milieux thermiques solides.

Les *lits de pierres* consistent en de grands contenants de gravier propre à travers lesquels circule un fluide caloporteur, comme l'air chaud d'un système de chauffage solaire. L'air de retour plus froid du bâtiment circule alors à travers le lit pour extraire l'énergie thermique du milieu et chauffer l'environnement (figure 12).

La *charpente d'un bâtiment* accumule efficacement de l'énergie thermique. En effet, lorsqu'un espace est préchauffé ou prérefroidi, de l'énergie thermique est «absorbée» dans les planchers, les murs, le plafond et les autres éléments de construction. Lorsque l'équipement est arrêté pendant une pointe de charge électrique ou si l'équipement ne suffit pas à la demande, cette énergie accumulée est retournée à l'espace. On permet à la température du bâtiment de varier pendant la charge et la décharge pour économiser l'énergie. Cette *«variation de température»* est limitée à 2°C dans un bureau ou un environnement commercial et à environ 3°C dans une usine, pour réduire les risques de plaintes par les occupants. Lorsqu'on préchauffe ou prérefroidit un bâtiment, on peut réduire les exigences, par conséquence la capacité thermique de l'équipement et la demande électrique. Cette technique est très courante dans les cinémas où les pointes de charge sont habituellement de courte durée.



Accumulation thermique par un lit de pierres
(décharge)
Figure 12



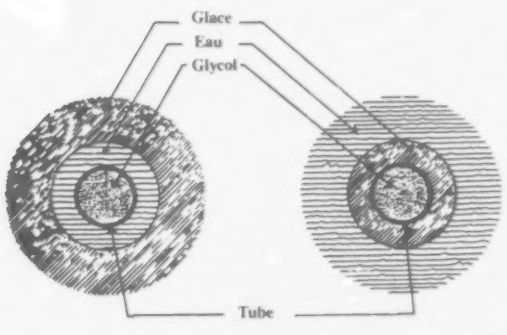
Générateur de glace en bloc
Figure 13

Milieu thermique à changement de phase

Dans la plupart des systèmes d'accumulation thermique avec changement de phase ou d'état, on utilise l'eau comme milieu thermique. Ces systèmes se divisent en deux catégories.

- *Générateurs de glace solide* – Du glycol à −2°C provenant d'une machine frigorifique (figure 13) circule dans les serpentins d'un réservoir d'eau. De la glace solide s'accumule autour des serpentins (figure 14). Une deuxième boucle de glycol transfère le glycol de basse température à un échangeur de chaleur (en option) où l'eau glacée est réfrigérée. Dans certains systèmes, il n'y a pas de boucle de glycol intermédiaire et l'eau provient directement du réservoir de glace.
- *Générateurs de glace en flocons* – De minces feuilles de glace brisées sont emmagasinées dans une trémie (figure 15), extraites par une auge et déposées dans une plus petite trémie munie d'un serpentin intégré au générateur d'eau glacée. L'eau est refroidie en circulant à travers le serpentin.

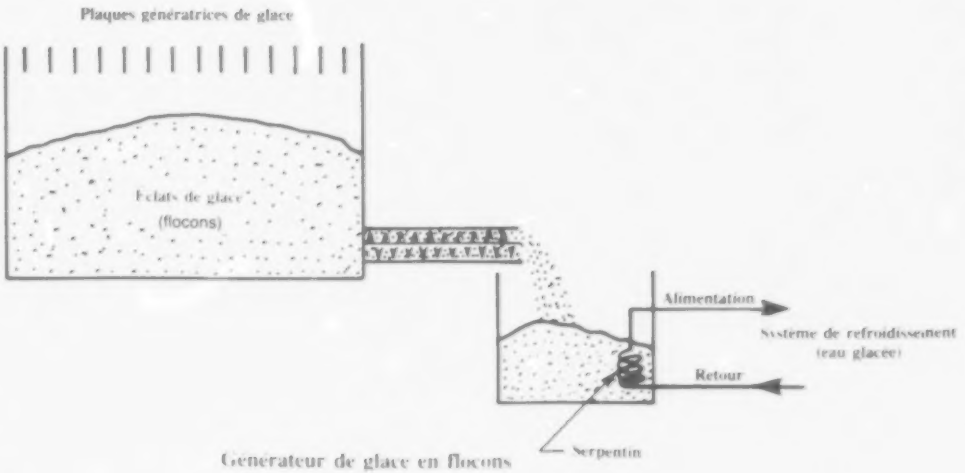
Les générateurs de glace sont très en demande pour les projets de rénovation où l'espace est restreint. Ces systèmes peuvent accumuler environ 10 fois plus d'énergie de refroidissement par unité de volume que l'eau glacée.



Décharge – La température du glycol d'admission est supérieure à celle du glycol de sortie. (Fusion de glace)

Charge – La température du glycol d'admission est (Production de glace)

Vue transversale des serpentins générateurs de glace dans un système d'accumulation de glace
Figure 14



Générateur de glace en flocons

Figure 15

Il faut tenir compte des facteurs suivants lors de la conception d'un système d'accumulation de glace.

- *Pertes d'énergie du milieu thermique en réserve* – Les pertes des réserves des systèmes d'accumulation thermique avec changement de phase sont supérieures à celles des systèmes d'accumulation de chaleur sensible en raison de la plus grande différence de température entre le milieu thermique et les conditions ambiantes. Il faut bien installer les pare-vapeur et l'isolant pour éviter tout dommage entraîné par la condensation.
- *Dilatation thermique* – Il faut prévoir de l'espace pour la dilatation et la contraction du milieu thermique et des raccords de l'équipement au réservoir pour empêcher tout dommage à l'équipement et toute fuite.
- *Agitateurs* – On obtient des taux d'échange de chaleur plus élevés et une glace de plus haute densité lorsque la solution entourant les serpentins est légèrement agitée. Un «barboteur» est le plus souvent utilisé pour agiter la solution.
- *Alimentation électrique des systèmes frigorifiques* – Comme les systèmes frigorifiques mécaniques sont moins efficaces dans la production de la glace que dans celle de l'eau glacée, ils consomment une plus grande quantité d'énergie. On obtient toutefois une plus grande charge de refroidissement par unité de volume.

Étangs et nappes aquifères

Des installations déjà existantes peuvent accumuler de l'énergie de refroidissement par le biais d'un petit étang creusé sur les lieux. Dans certains cas, l'étang peut faire partie de l'aménagement paysager. On obtient le refroidissement par évaporation à la surface et on peut même en augmenter le taux en ajoutant un jet d'eau ou une fontaine. Les étangs peuvent être utilisés comme des systèmes de stockage d'énergie extérieurs ou pour rejeter la chaleur excédentaire du système frigorifique ou de l'équipement des procédés (dissipateur thermique).

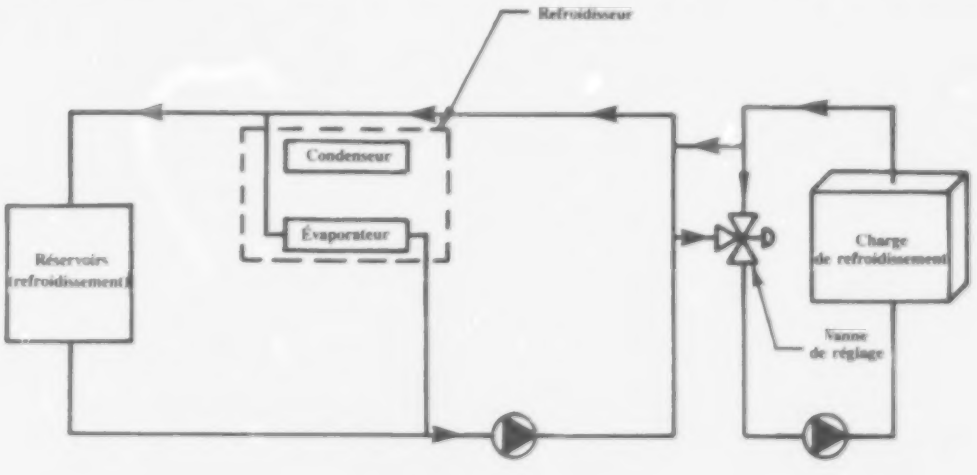
Des puits ont été creusés pour acheminer l'eau jusqu'aux nappes aquifères souterraines (formations souterraines de roches, de sable ou de gravier renfermant une nappe d'eau). L'espacement, la profondeur et les dimensions des puits sont fonction directe des couches aquifères. On doit obtenir des permis spéciaux du gouvernement provincial pour creuser des puits à cette fin. Des réseaux de tuyauteries souterrains ont aussi été utilisés pour extraire l'énergie du sol (habituellement pour le refroidissement). Quoique ni l'une ni l'autre de ces méthodes soient courantes, un certain nombre de sites ont été exploités avec succès.

Systèmes de stockage d'énergie types

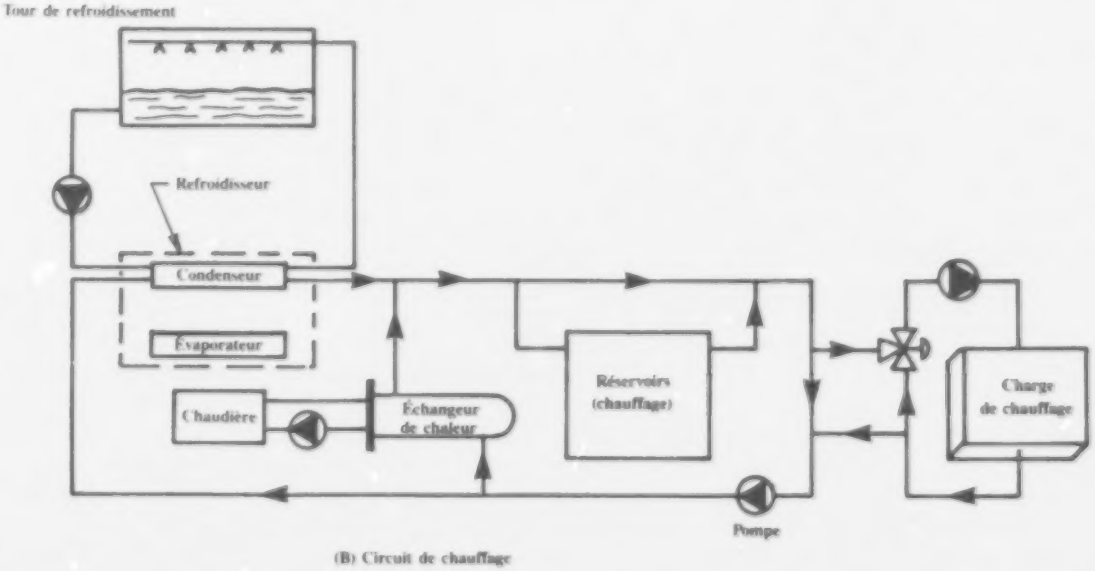
Chaque projet d'accumulation thermique est unique en son genre à cause des différents profils de charge, des conditions atmosphériques, des coûts énergétiques et de la politique financière de l'entreprise. Certains systèmes généraux peuvent toutefois être décrits afin de présenter leurs caractéristiques principales. Les sections suivantes décrivent brièvement des systèmes de stockage d'énergie de base.

Accumulation de chaleur et de froid obtenue par refroidisseur

L'objet principal du schéma de la figure 16 est de réduire l'appel de demande du refroidisseur. Un deuxième avantage constitue le transfert de la charge de chauffage au refroidisseur. Il est à noter que le chauffage par résistance électrique coûte habituellement plus cher que le chauffage au gaz et au pétrole. Toutefois, si un refroidisseur fonctionne avec un COP de 3, il peut fournir de la chaleur à un prix plus économique que le gaz. Lorsqu'on le combine à un système de stockage d'énergie, il charge le système durant les périodes creuses et réduit par conséquent la prime de puissance. Voici comment pourrait fonctionner un système pour un complexe commercial et à bureaux.



(A) Circuit de refroidissement



(B) Circuit de chauffage

Système de stockage d'énergie de chauffage et de refroidissement
Figure 16

Charge de refroidissement – Lorsqu'il y a une demande en refroidissement, de l'eau glacée est prélevée du réservoir de stockage d'énergie, pompée vers la charge (serpentins, équipement de procédé, etc.) à travers un circuit secondaire et retournée à un réservoir vide. Lorsqu'un réservoir est complètement vidé de son eau glacée, il est utilisé comme réservoir de retour.

Le refroidisseur, raccordé en parallèle avec les réservoirs, peut fonctionner de deux façons. Lorsque le système fonctionne à pleine capacité, on peut arrêter le refroidisseur pendant la période de pointe et réduire ainsi les pointes de charge de l'installation. Un fonctionnement à pleine capacité peut toutefois ne pas être pratique. Lorsque l'accumulation est partielle, le refroidisseur fonctionne à charge réduite. Les pointes de charge du bâtiment sont réduites mais à un taux moindre que si toute la charge de refroidissement provenait du système de stockage d'énergie.

Le refroidisseur fonctionne pendant les périodes creuses pour charger le système d'accumulation d'eau glacée. Il faut cependant s'assurer de ne pas provoquer de nouvelles pointes de charge électrique pendant cette opération.

Charge de chauffage – Lorsqu'il y a une demande simultanée en chauffage et en refroidissement, on obtient la charge de refroidissement par l'évaporateur du refroidisseur, tel que mentionné précédemment.

Pendant les périodes creuses le refroidisseur, qui fonctionne comme une pompe à chaleur, charge simultanément les réservoirs de chauffage et de refroidissement. Ces derniers sont vidés et remplis alternativement jusqu'à ce qu'ils soient chargés.

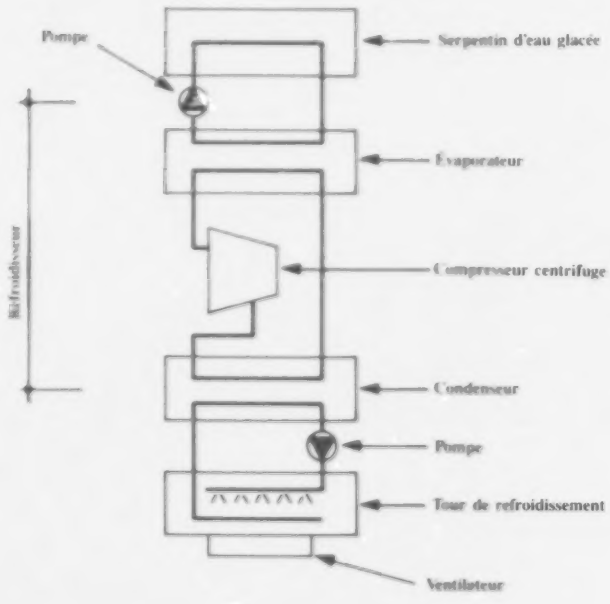
S'il y a une demande en chauffage pendant que l'on charge le réservoir d'eau chaude, la chaleur peut être obtenue du système de stockage, du condenseur ou des chaudières, selon la quantité d'énergie accumulée et la stratégie choisie par l'opérateur.

On peut prélever au besoin de l'énergie thermique des réservoirs pendant les périodes de pointe.

Il est très avantageux de faire fonctionner le refroidisseur ou la pompe à chaleur hors des heures d'opération pour satisfaire la demande de refroidissement et de chauffage en prenant avantage du COP. Dans ce cas, le refroidissement «naturel» provenant de l'air extérieur n'est plus économique et l'installation d'un réseau de gaines d'air extérieur de moins grand diamètre et de ventilateurs de plus petites dimensions pourrait réduire l'investissement relatif à une nouvelle construction.

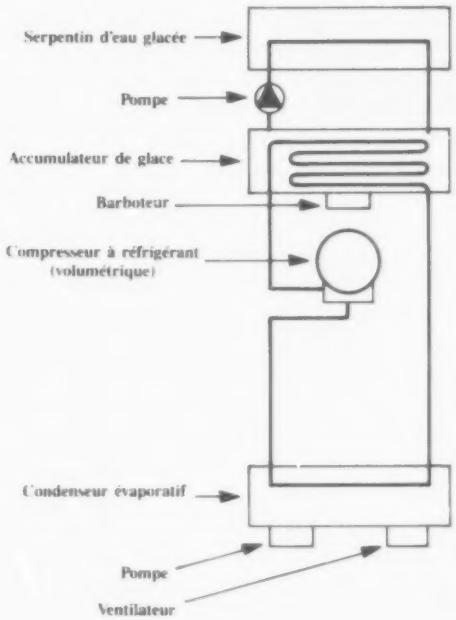
Accumulation de glace

La figure 1 illustre un profil de charge de refroidissement type d'un bâtiment commercial. Le profil de charge électrique ressemblerait à celui de la figure 2 si un système de refroidissement classique satisfait la demande (figure 17). Par conséquent, la charge électrique du refroidisseur et la charge de refroidissement atteindraient toutes les deux une valeur maximale en fin d'après-midi.

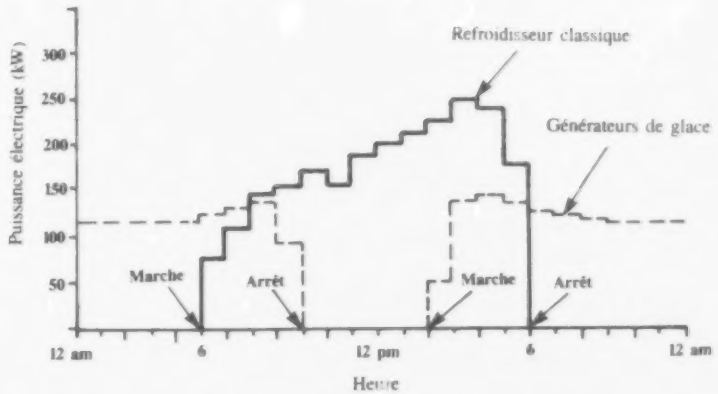


Système de refroidissement classique
Figure 17

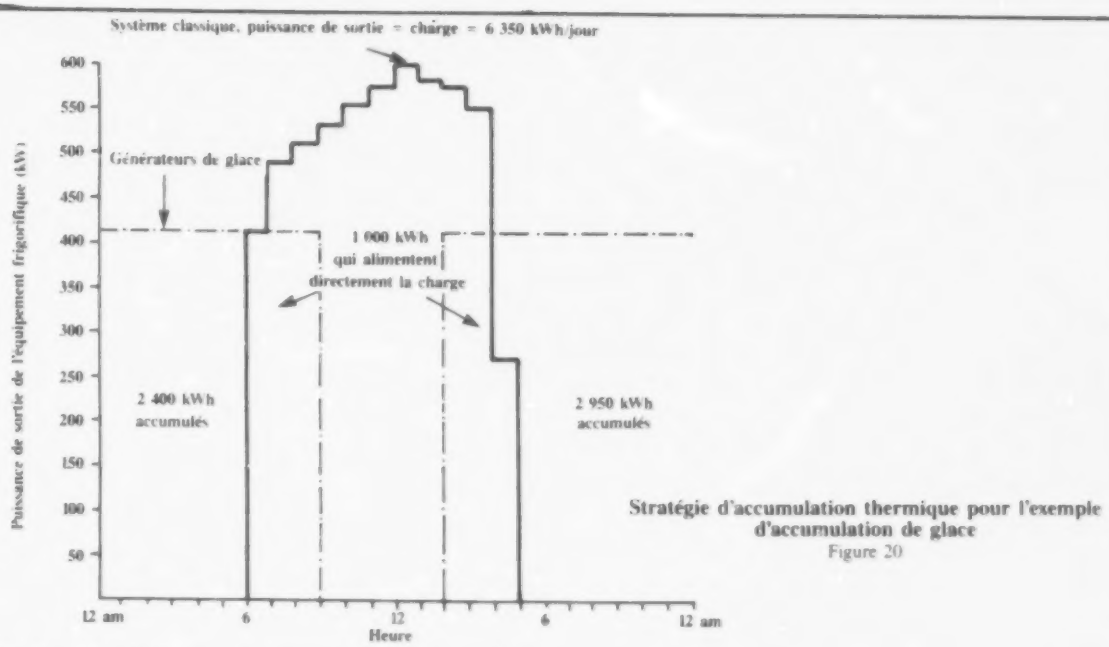
On peut concevoir un système d'accumulation de glace (figure 18) qui satisferait toutes les charges de refroidissement pendant les heures de pointe de l'installation et reduirait la puissance appelée. La production de glace survient en dehors des heures de pointe, soit les fins de semaine et au tout début de la matinée alors que les charges thermiques et autres charges électriques sont plus faibles. Selon les figures 19 et 20, le refroidisseur ou le générateur de glace est arrêté pendant les heures de pointe. La chaleur évacuée par l'équipement frigorifique pourrait être utilisée pour chauffer l'eau et ainsi économiser plus d'énergie.



Système d'accumulation de glace
Figure 18



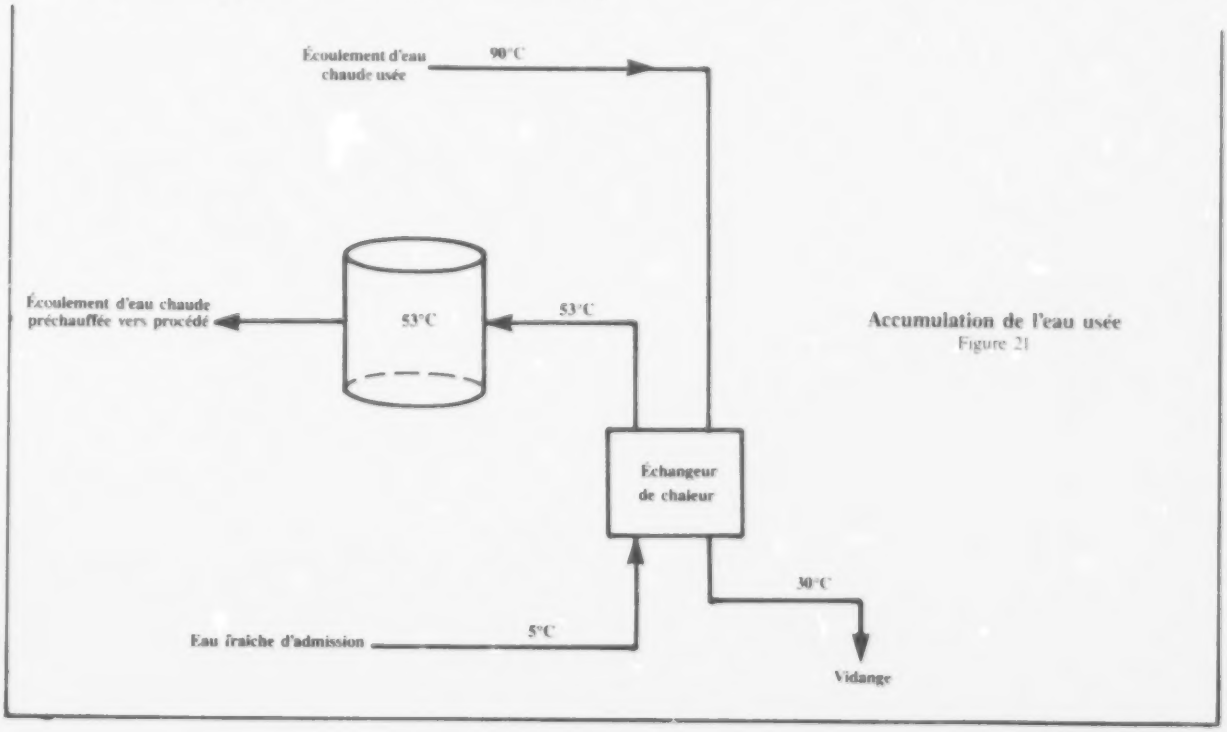
Profils de charge électrique pour l'exemple d'accumulation de glace
Figure 19



Stratégie d'accumulation thermique pour l'exemple d'accumulation de glace
Figure 20

Récupération de chaleur par accumulation thermique

Un système de stockage d'énergie utilisé comme réservoir permet d'assortir les débits d'eau d'appoint et usée aux exigences du procédé (figure 21). Quoique l'accumulation de l'eau usée contaminée ou sale ne soit pas souvent pratique, l'eau usée peut souvent préchauffer l'eau d'appoint propre par le biais d'un échangeur de chaleur. L'eau préchauffée est alors emmagasinée jusqu'au moment de son utilisation. Les avantages sont d'autant plus grands si de grands volumes à haute température sont disponibles. Dans ce cas, puisque le COP du système est plus élevé, une plus grande quantité d'énergie peut être transférée. L'utilisation directe de la chaleur gaspillée pour le préchauffage est plus efficace que l'accumulation. Cette méthode n'est toutefois possible que si le chauffage d'appoint et l'extraction de la chaleur gaspillée surviennent en même temps.



Accumulation de l'eau usée
Figure 21

Appareils de régulation

L'optimisation des systèmes de stockage d'énergie d'un bâtiment est assurée lorsqu'il y a souplesse de régulation, puisque les modes de fonctionnement et les horaires varient continuellement et sont très difficiles à prévoir. Un système intégrant des appareils de régulation manuels ou des appareils informatisés est efficace pourvu que le fonctionnement puisse facilement être ajusté en fonction des exigences de l'installation.

Il faut surveiller le fonctionnement du système de stockage d'énergie pour suivre son rendement, identifier toute défectuosité et en déceler les faiblesses. Les petits systèmes peuvent être surveillés par des appareils de mesure et des jauges ordinaires dont les résultats sont enregistrés manuellement. Les systèmes de plus grande importance sont habituellement dotés d'appareils de mesures électroniques et de systèmes de régulation assurant l'enregistrement automatique des données, l'analyse des tendances et d'autres fonctions. Pour obtenir plus de détails sur les appareils de régulation, se référer aux Modules 15 et 16 intitulés respectivement «Mesures et contrôle» et «Régulation automatique».

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Les Possibilités de gestion de l'énergie identifient différentes façons d'utiliser rationnellement l'énergie pour réduire les coûts d'exploitation. Dans le présent chapitre, plusieurs exemples de possibilités types sont donnés sous les rubriques Possibilités de maintenance, Possibilités d'amélioration de coût modique et Possibilités de rénovation. Le chapitre n'énumère pas de façon exhaustive toutes les possibilités d'accumulation thermique. Il est toutefois destiné à stimuler la vigilance du personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance dans la recherche de toutes les possibilités qu'offre leur installation.

Avant d'étudier les possibilités d'accumulation thermique . . .

Avant d'examiner les possibilités d'accumulation thermique d'une installation, le propriétaire ou l'opérateur doit d'abord mettre en application les possibilités classiques de gestion de l'énergie détaillées dans les autres modules de la présente série. En effet, la réduction des pertes d'énergie et l'optimisation des systèmes déjà en place sont habituellement plus rentables que l'installation d'un système de stockage d'énergie. Si, ultérieurement, l'installation semble se prêter à ce genre de système, on peut alors effectuer des analyses plus poussées pour évaluer les économies possibles.

La première étape du processus d'évaluation des Possibilités de gestion de l'énergie par accumulation thermique consiste habituellement à établir un profil de la puissance appelée du bâtiment durant plusieurs périodes d'exploitation types. On peut alors étudier les courbes et identifier les charges qui pourraient être transférées aux périodes creuses et les opérations dont l'horaire de fonctionnement pourrait être modifié pour éliminer toute pointe de charge inutile. La feuille de travail 19-1 peut servir à évaluer les possibilités de réduction de la prime de puissance.

Possibilités de maintenance

Les Possibilités de maintenance sont des initiatives d'économie d'énergie *exécutées de façon périodique, au moins une fois par année*. En voici quelques exemples:

1. Isoler les réservoirs s'ils ne sont pas en train d'être chargés ou déchargés. Lorsque les réservoirs ne sont pas bien isolés, la capacité de stockage est diminuée par les mélanges inutiles et par conséquent, l'équipement thermique doit supporter des charges inutiles.
2. Réparer les fuites de réservoir pour éviter les pertes de capacité de stockage et réduire les coûts relatifs à l'eau d'appoint et au traitement de l'eau. Une accumulation inadéquate peut rendre nécessaire le démarrage d'urgence de l'équipement et par conséquent entraîner une nouvelle pointe de charge électrique. Les fuites d'eau peuvent également causer des dommages.
3. Vérifier la concentration d'antigel (glycol) dans les générateurs de glace. Lorsque la concentration est trop élevée, l'efficacité de l'échangeur thermique est réduite et la pompe consomme plus d'électricité. Lorsque la concentration n'est pas assez élevée, le gel peut endommager l'équipement.
4. Garder le milieu thermique propre. S'assurer que les tamis et les filtres sont nettoyés régulièrement pour éviter que la pompe et le ventilateur ne consomment inutilement de l'électricité. S'assurer que l'eau est bien traitée pour empêcher la croissance d'algues. Garder les filtres des lits de pierres propres pour éviter que la saleté et la charpie ne colmatent le milieu et augmentent la consommation électrique du ventilateur.
5. Examiner les données relatives au fonctionnement du système et les factures d'énergie qui s'y rattachent. Modifier les stratégies d'exploitation pour optimiser le système selon les opérations réelles plutôt que les prévisions lors de la conception.
6. Vérifier le fonctionnement de tous les composants de régulation, tout particulièrement les sondes de température. Lorsque les appareils de régulation ne fonctionnent pas de manière appropriée, l'équipement peut être endommagé et l'efficacité ainsi que la capacité de stockage du système diminuent.
7. Entretenir tout l'équipement mécanique conformément aux instructions du fournisseur.
8. Réparer/remplacer tout isolant endommagé.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Les *Possibilités d'amélioration de coût modique* sont des initiatives de gestion de l'énergie *réalisées une seule fois et dont le coût n'est pas élevé*. En voici quelques exemples:

1. Tirer avantage de la capacité d'un bâtiment à stocker de l'énergie de chauffage et de refroidissement pour réduire la puissance appelée pendant les périodes de pointe.
2. Tirer avantage de la capacité de l'équipement des procédés à stocker de l'énergie pour diminuer le fonctionnement de l'équipement de chauffage pendant les périodes de réchauffage de l'installation.
3. Prérefroidir les boucles d'eau glacée avant les périodes de pointe pour réduire la puissance appelée du refroidisseur en arrêtant ce dernier ou en limitant sa charge.
4. Élever la température du chauffe-eau domestique. Tirer avantage de cette plus grande capacité thermique pour ne pas faire fonctionner l'équipement de chauffage pendant les périodes de pointe. Maintenir l'eau d'alimentation à la température normale en installant une vanne à trois voies à sécurité intrinsèque pour mélanger l'eau d'appoint chauffée et froide.
5. Utiliser l'équipement disponible (réservoirs, pompes, etc.) pour réduire la mise de fonds.

Exemples concrets d'amélioration de coût modique

1. Exploiter les possibilités d'accumulation thermique de la charpente du bâtiment

On peut tirer avantage de la capacité de la charpente d'un bâtiment à stocker de l'énergie pour réduire les pointes de charge électrique et éviter l'addition de nouveaux équipements de chauffage et de refroidissement. Pour accumuler l'énergie de refroidissement pour une installation industrielle climatisée de 5 000 m^2, il faudrait se conformer à la pratique suivante.

- Maintenir l'ambiance à 1,5°C au-dessous de la normale, une heure avant la période de pointe, pour permettre à l'énergie de refroidissement d'être «absorbée» par la charpente du bâtiment.
- Lorsque les charges électriques approchent la valeur maximale, réduire la puissance appelée par le refroidisseur à l'aide d'un interrupteur limiteur de charge.
- Permettre à la température ambiante de s'élever à 1,5°C au-dessus de la température normale pendant les périodes de pointe.

On peut calculer la capacité thermique pouvant être accumulée lorsqu'il y a variation de 3°C.

$$E = 0{,}370 \times A$$

$$= 0{,}370 \times 5\,000$$

$$= 1\,850 \text{ MJ}$$

$$\text{où, } = \frac{1\,850 \text{ MJ}}{3{,}6 \text{ MJ/kWh}}$$

$$= 514 \text{ kWh}$$

On obtient ainsi une réduction de la prime de puissance électrique. Une réduction de 514 kWh de la charge frigorifique pendant une période d'une heure entraîne une réduction d'environ 145 kW de la puissance appelée par le refroidisseur (lorsque le COP = 3,54). Une telle diminution entraîne une réduction mensuelle de 145 x 6 = 870$ de la prime de puissance basée sur un tarif de 6$ par kW.

La même installation pourrait également stocker 1 850 MJ d'énergie thermique pendant la saison de chauffage, s'il y avait variation de température de 3°C. Comme la température s'élève pendant les périodes de production et que cette énergie accumulée est distribuée pendant les périodes creuses, les demandes en chauffage du bâtiment en sont réduites. On peut évaluer comme suit les économies de combustible par cycle de production d'une installation chauffée au gaz:

Coût du gaz naturel	0,14$/$m^3$
Rendement de l'ensemble du système de chauffage	68%
Pouvoir calorifique du gaz naturel (annexe C)	37,2 MJ/m^3

$$\text{Coût du gaz par cycle de chauffage} = \frac{1\,850\ \text{MJ} \times 0{,}14\$/\text{m}^3}{37{,}2\ \text{MJ/m}^3 \times 0{,}68}$$

$$= 10{,}24\$$$

Supposons 5 cycles de chauffage par semaine et une saison de chauffage de 16 semaines pendant lesquelles on peut utiliser la chaleur accumulée et une saison de refroidissement de 5 mois. On peut calculer les économies annuelles de la façon suivante:

$$\text{Économies annuelles} = (10{,}24\$ \times 5\ \text{cycles/semaine} \times 16\ \text{semaines/an}) + (5\ \text{mois} \times 870\$/\text{mois})$$

$$= 819\$ + 4\,350\$ = 5\,169\$$$

Les investissements relatifs à la modification des appareils de régulation et à l'installation des registres dans les gaines d'évacuation et d'admission d'air frais ont été évalués à 5 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{5\,000\$}{5\,169\$}$$

$$= 1\ \text{an (environ)}$$

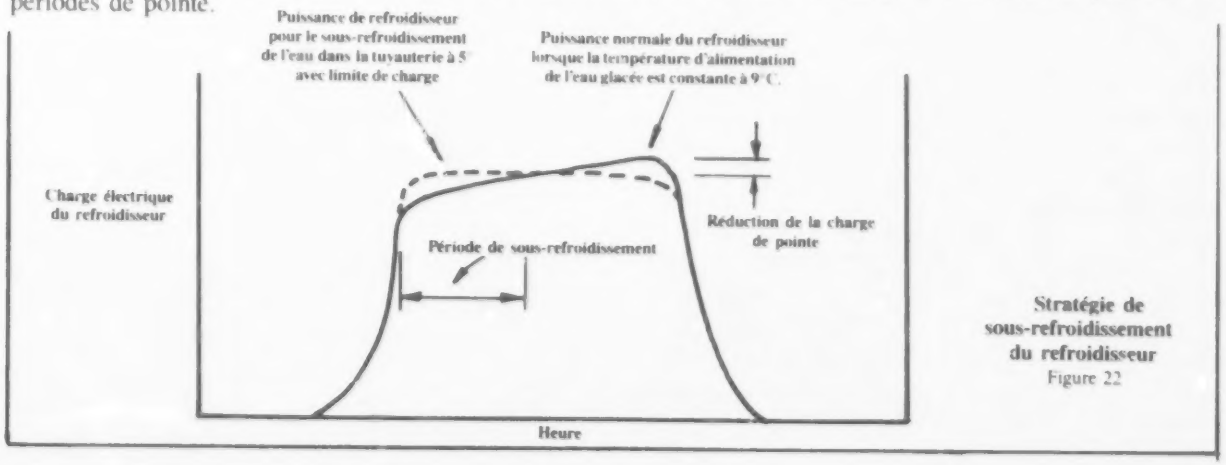
2. Accumulation thermique provenant de l'équipement et des produits

Les équipements et les produits industriels peuvent stocker de l'énergie de la même manière que la charpente d'un bâtiment. Par exemple, si l'équipement du procédé doit être refroidi pendant le cycle de production normal et que le bâtiment demande de la chaleur pendant les heures creuses, on peut examiner la possibilité de réduire la charge de refroidissement à la fin du cycle pour accumuler la chaleur dans l'équipement. Le refroidissement se ferait lentement pendant les heures creuses tout en diminuant la demande en chauffage du bâtiment. On réduit le chauffage et le refroidissement simultanément.

Lorsque certains produits chauds comme des feuilles métalliques en rouleau doivent être refroidies avant leur manipulation, on propose de placer les aires de refroidissement au périmètre du bâtiment pour que la chaleur émise par le produit compense les pertes de chaleur de l'installation.

3. Accumulation thermique provenant des réseaux de tuyauteries

Le *liquide circulant dans les boucles de tuyauterie ou dans les réservoirs peut être utilisé comme milieu thermique*. Prenons comme exemple un système dont l'eau doit être à 9°C pour satisfaire la demande de refroidissement. La charge thermique exige le fonctionnement du refroidisseur à pleine capacité et par conséquent détermine la prime de puissance du mois (figure 22). Si l'on abaisse la température de l'eau à 5°C avant la période de pointe prévue, la capacité thermique de l'eau glacée est augmentée, ce qui réduit la charge du refroidisseur pendant les périodes de pointe.



Stratégie de sous-refroidissement du refroidisseur
Figure 22

Si la capacité frigorifique d'un refroidisseur installé dans un bâtiment est de 1 000 kW et si 4 000 litres d'eau circulent dans le réseau de tuyauteries, les calculs suivants démontrent que l'on peut réduire la température de l'eau de 4°C et emmagasiner 18,6 kWh (67 MJ) de capacité frigorifique dans l'eau.

$$E = \frac{V \times d \times DT \times cp}{1\,000} \times \frac{1}{3{,}6 \text{ MJ/kWh}}$$

$$= \frac{4\,000(L) \times 1(kg/L) \times 4\ (°C) \times 4{,}1855[kJ/(kg.°C)]}{1\,000 \text{ kJ/MJ} \times 3{,}6 \text{ MJ/kWh}}$$

$$= \frac{4\,000 \times 1 \times 4 \times 4{,}1855}{1\,000 \times 3{,}6}$$

$$= 18{,}6 \text{ kWh}$$

Grâce à l'accumulation thermique, une capacité frigorifique de 18,6 kW est assurée une heure d'avance pour éviter une période de pointe et réduire la prime de puissance électrique. Si le tarif est de 6$ par kW et que le COP du refroidisseur est de 3,5, les économies suivantes peuvent être calculées:

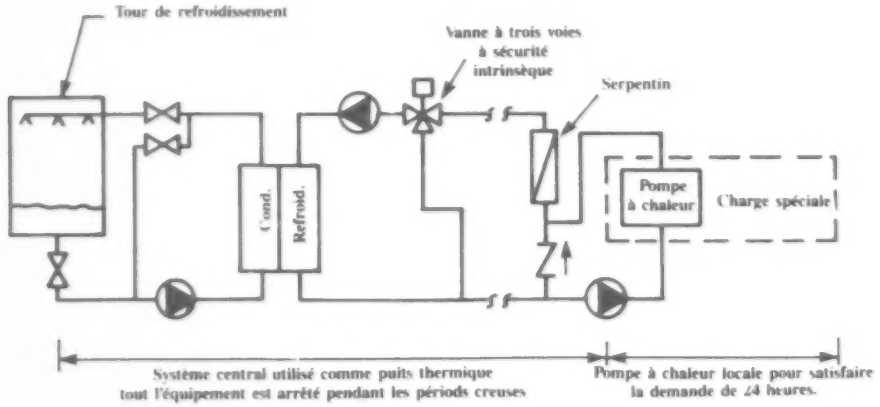
$$\text{Économies annuelles} = \frac{18{,}6 \times 6 \times 12}{3{,}5}$$

$$= 383\$$$

En tenant compte des 700$ versés pour l'achat d'une minuterie et d'un régulateur compensateur, on obtient la période de rentabilité suivante:

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{700\$}{383\$} = 1{,}8 \text{ an}$$

On peut appliquer une méthode d'accumulation thermique similaire pour résoudre les problèmes de chauffage ou de refroidissement d'ambiance d'une grande installation. Par exemple, le système central de refroidissement d'un complexe commercial et de bureaux comprend un réseau de tuyauteries qui achemine l'eau glacée vers différents secteurs du bâtiment. Quoique ce dernier soit inoccupé pendant la nuit et les fins de semaine, la pièce de la centrale téléphonique exige un refroidissement constant. Le refroidisseur ne fonctionne pas très bien à charge partielle. Grâce à une pompe à chaleur alimentée en eau et utilisant le réseau existant de tuyauteries d'eau glacée comme puits thermique, tous les systèmes centraux y compris les pompes centrales, peuvent être arrêtés (figure 23). Une petite pompe pourrait faire circuler l'eau glacée pour satisfaire la demande de la pompe à chaleur. Dépendant de la charge, la capacité d'accumulation thermique du réseau de tuyauteries d'eau glacée est souvent suffisante pour arrêter le refroidisseur toute la fin de semaine. L'arrêt du refroidisseur, de la tour de refroidissement et des pompes réalisent ainsi des économies d'énergie.



Utilisation du réseau de tuyauteries comme puits thermique pour des applications spéciales
Figure 23

4. Élever le point de consigne de température d'un réservoir

On peut faire fonctionner les systèmes à eau chaude intègrant un réservoir de façon à augmenter les possibilités d'accumulation thermique.

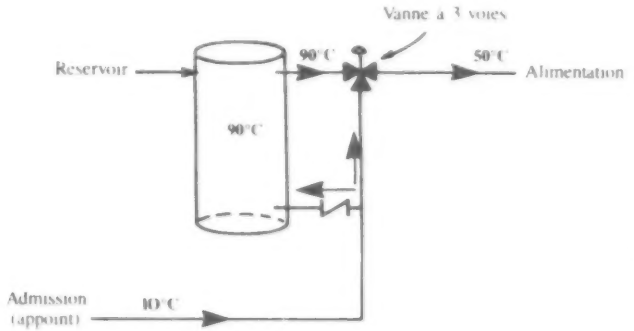
Prenons par exemple un réservoir qui maintient l'eau à 50°C. Si l'on élève la température à 90°C, l'énergie thermique emmagasinée par l'eau du réservoir augmente également. L'alimentation en eau du système est maintenue à 50°C en mélangeant l'eau à 90°C du réservoir et l'eau froide d'appoint (figure 24). L'augmenttion de la capacité d'accumulation thermique engendrée par l'élévation de la température du réservoir peut réduire ou éliminer la charge de chauffage d'eau potable pendant les périodes de pointe électrique. Cette technique permet également de ne pas ajouter d'équipements de chauffage additionnels pour satisfaire la demande lorsque le bâtiment est agrandi ou lorsque les charges sont augmentées.

On peut calculer la proportion d'eau d'alimentation provenant de l'eau chaude du réservoir par l'équation suivante. (On ne tient pas compte du débit de retour parce que la capacité est négligeable.)

$$\text{Fraction de l'eau du réservoir} = \frac{DT_1}{DT_2}$$

où DT_1 = (température d'alimentation) − (température d'appoint), (°C)

DT_2 = (température du réservoir) − (température d'appoint), (°C)



Élevation de la température de l'eau accumulée
Figure 24

Prenons le système de la figure 24 dont la température de l'eau chaude accumulée est de 90°C, de l'eau d'alimentation 50°C et de l'eau d'appoint, 10°C. On peut calculer la demande en eau chauffée à 90°C du réservoir pour satisfaire la température d'alimentation de 50°C de la façon suivante:

$$\text{Fraction de l'eau du réservoir d'alimentation} = \frac{(50 - 10)}{(90 - 10)}$$

$$= \frac{40}{80} = 0{,}50$$

Le taux d'extraction d'eau du réservoir de 90°C serait 50% du taux requis si le température de l'eau du réservoir était maintenue à 50°C. On a pu doubler la capacité d'accumulation thermique (1 divisé par 0,50) tout en assurant les charges d'eau chaude de pointe sans augmenter la puissance appelée du système de chauffage de l'eau.

Un système de chauffe-eau domestiques possède un réservoir de 5 000 litres et une capacité de chauffage électrique de 100 kW. Pendant les périodes de pointe électrique, le système consommait 60 kW d'électricité pour maintenir la température d'alimentation en eau à 50°C. On a augmenté le point de consigne de température du réservoir à 90°C pendant les périodes creuses. On a programmé le fonctionnement des chauffe-eau électriques pour qu'ils démarrent le matin une heure avant la période de pointe d'utilisation de l'eau. L'alimentation électrique des chauffe-eau était automatiquement coupée par une minuterie pendant les périodes de pointes électriques. En modifiant ainsi le réglage de la température du réservoir, plutôt que de maintenir le réservoir à 90°C toute la journée, on réduit les périodes durant lesquelles la température de l'eau est très élevée et ainsi les pertes de chaleur et les risques d'entartrage et de corrosion. On peut réduire la pointe de charge mensuelle de 60 kW en coupant automatiquement les chauffe-eau pendant les périodes de pointe.

Économies annuelles = réduction de la puissance appelée/mois x mois/an x $/kW

= 60 kW/mo x 12 mo/an x 6$/kW

= 4 320$/an

On a évalué à 3 500$ le coût pour modifier le système.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{3\ 500}{4\ 320} = 0{,}81 \text{ an (10 mois)}$$

Une vanne à trois voies est utilisée pour mélanger l'eau très chaude et l'eau d'appoint et augmenter ainsi la capacité de stocker de l'énergie. Pour protéger les usagers contre l'ébouillantage en cas d'une panne, la vanne à trois voies devrait inclure un dispositif à sécurité intrinsèque. On recommande d'ajouter de l'isolant au réservoir car l'augmentation de la température d'accumulation d'eau augmente le taux des pertes de chaleur du réservoir. Avant d'élever la température de service du réservoir, il faut consulter le fournisseur pour bien s'assurer que la température et la pression nominales du réservoir ne seront pas dépassées. Dans un système ouvert, comme un chauffe-eau domestique dans lequel circule de l'eau fraîche régulièrement, il faut prendre des précautions spéciales comme installer des anodes sacrificielles ou adoucir l'eau pour éviter l'entartrage et la corrosion du réservoir. Ces deux phénomènes augmentent lorsqu'on augmente la température de l'eau.

Possibilités de rénovation

Les *Possibilités de rénovation* sont des initiatives de gestion de l'énergie *réalisées en une seule fois et dont le coût est important*. La plupart des possibilités de cette catégorie demande l'analyse approfondie d'un spécialiste. En voici quelques exemples:

1. Ajouter des réservoirs à *eau sous pression* aux systèmes de chauffage et d'eau chaude domestique.
2. Installer des systèmes d'accumulation d'eau chauffée ou glacée pour éviter l'achat d'équipement de chauffage ou de refroidissement additionnel lorsqu'un procédé est ajouté ou le bâtiment agrandi.
3. Évacuer l'eau usée à travers un échangeur de chaleur pour transférer la chaleur à l'eau d'appoint. Installer un réservoir pour entreposer temporairement l'eau d'appoint préchauffée jusqu'au moment de son utilisation. Au besoin, étudier la possibilité d'utiliser une pompe à chaleur pour augmenter cette chaleur.
4. Lorsque l'espace est un facteur important, ajouter un système *d'accumulation de glace en bloc* aux générateurs d'eau glacée. Lorsque l'espace n'est pas un problème, étudier la possibilité d'accumuler de la glace en flocons ou de l'eau glacée.
5. Ajouter des trémies pour l'accumulation de sel à phase changeante à la pompe à chaleur, à la chaudière, au système de chauffage central ou aux collecteurs solaires. Lorsque l'espace le permet, étudier la possibilité d'installer des réservoirs d'eau chaude.

Les exemples concrets suivants identifient les possibilités de réduction de la prime de puissance électrique et de récupération de la chaleur gaspillée.

Exemples concrets de possibilités de rénovation

1. Systèmes à eau sous pression

Lorsqu'on augmente la température du réservoir, on augmente par le fait même sa capacité d'accumulation thermique. La plupart des réservoirs et des systèmes sont limitées à 90°C à cause des caractéristiques du réservoir. On peut toutefois élever la température de l'eau en installant un réservoir sous pression fermé et un échangeur de chaleur raccordés au système du chauffage (figure 25). Il faut installer également une vanne à trois voies à sécurité intrinsèque pour s'assurer que l'eau très chaude ne s'introduit pas dans le système de chauffage.

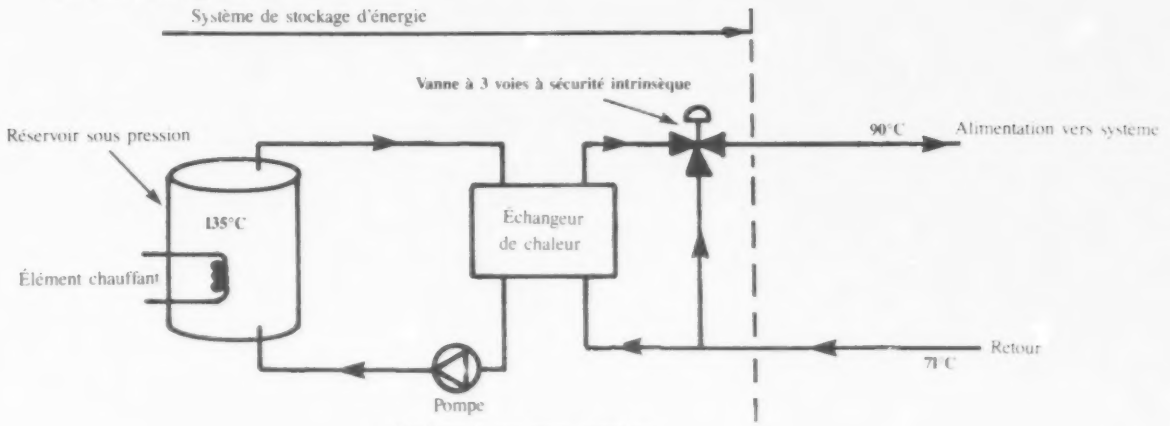
Pour le système d'accumulation sous pression raccordé au circuit d'eau chaude d'un bâtiment, l'eau du réservoir pourrait être chauffée à 135°C avant la période de pointe et distribuée à 90°C durant cette même période. On peut calculer la capacité d'accumulation thermique additionnelle de l'eau comme suit:

$$E = \frac{M \times cp \times DT}{1\ 000}$$

Note: pour l'eau, 1 kg = 1 L et cp = 4,1855 kJ/(kg.°C)

$$E = \frac{1 \times 4{,}1855 \times (135 - 90)}{1\,000}$$

$$= 0{,}188 \text{ MJ/kg ou MJ/L}$$



Système à eau sous pression
Figure 25

Prenons un bâtiment consommant 2 600 kW pour chauffer l'eau chaude et dont la période de pointe est d'une heure. La température d'alimentation de l'eau chaude doit être de 90°C. Si l'on installe 4 réservoirs sous pression de 9 500 L, on peut accumuler 38 000 L (4 x 9 500) d'eau chaude de 135°C. Lorsque l'eau est chauffée à 135°C pendant les périodes creuses, la prime de puissance appelée est réduite parce que l'eau à 90°C provient du système de stockage d'énergie au lieu des chauffe-eau électriques. L'installation des 4 réservoirs et de leurs réseaux de tuyauteries a été évaluée à 160 000$.

Énergie accumulée (MJ) = Volume (L) x énergie accumulée additionnelle (MJ/L)

$$= 4 \times 9\,500 \times 0{,}188$$

$$= 7\,144 \text{ MJ}$$

$$\text{Réduction de la charge électrique (kW)} = \text{Énergie accumulée (MJ)} \times \frac{\text{heures (h)}}{3{,}6 \text{ MJ/kWh}}$$

$$= \frac{7\,144 \times 1}{3{,}6}$$

$$= 1\,984 \text{ kW}$$

Prime de puissance = 6$/kW

Saison de chauffage = 4,5 mois

Économies annuelles = 1 984 x 6 x 4,5

= 53 568$/an

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{160\,000\$}{53\,568\$}$$

= 3 ans

2. Accumulation de l'eau usée

Un procédé par lots évacue 20 000 L d'eau à 90°C. En ajoutant un réservoir d'une capacité de 20 000 L et un échangeur de chaleur, une certaine quantité d'énergie thermique provenant de l'eau usée peut être transférée à l'eau d'appoint. Si la température de l'eau usée est réduite à 30°C en passant à travers l'échangeur de chaleur, la chaleur stockée dans le réservoir d'eau usée pour chaque cycle d'évacuation peut être calculée comme suit:

$$E = \frac{M \times cp \times DT}{1\,000}$$

$$= \frac{20\,000 \times 4{,}1855 \times (90 - 30)}{1\,000}$$

$$= 5\,023 \text{ MJ}$$

À mesure que l'eau traverse l'échangeur de chaleur, environ 80% de la chaleur accumulée est transférée à l'eau fraîche d'admission. Environ 20% de la chaleur perdue provient de l'évaporation et des pertes de chaleur du réservoir et de la tuyauterie. Mille cycles d'évacuation sont prévus par année.

La chaleur récupérée réduit le préchauffage au gaz de l'eau d'apoint. Le pouvoir calorifique annuel récupéré peut être calculé pour un système brûlant du gaz naturel à un coût de 0,14$/m^3:

$$\text{Économies annuelles} = \frac{E \times EF_e \times Cf \times N}{Ef_b \times \text{pouvoir calorifique du combustible}}$$

où E = énergie dans le réservoir (MJ)

Ef_e = rendement de l'échangeur de chaleur (fixé à 0,80)

Ef_b = rendement de la chaudière (fixé à 0,70)

N = nombre de cycles de réservoir par année

Cf = coût du combustible ($/m^3)

$$\text{Économies annuelles} = \frac{5\,023 \times 0{,}8 \times 0{,}14 \times 1\,000}{0{,}7 \times 37{,}2}$$

$$= 21\,604\$$$

On évalue le coût de l'échangeur de chaleur, du réservoir et de la tuyauterie à 60 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{60\,000\$}{21\,604\$}$$

$$= 2{,}8 \text{ ans}$$

La capacité d'accumulation thermique de cette application est fonction du volume de liquide évacué par cycle et de la différence de température entre l'eau d'admission et de sortie de l'échangeur de chaleur ou de la pompe à chaleur. L'eau doit être filtrée au besoin pour éliminer tous les contaminants qui pourraient encrasser l'échangeur de chaleur et réduire son efficacité.

3. Réduction de la prime de puissance

Dans l'exemple qui suit, on utilise la feuille de travail 19-1 pour déterminer et évaluer les réductions possibles de la prime de puissance en reportant certaines demandes pendant les périodes creuses en faisant fonctionner les systèmes de stockage d'énergie. Pour des exemples de réduction de puissance appelée obtenus en limitant la charge raccordée, voir le Module 3 intitulé «Électricité».

Prenons comme exemple une usine où l'équipement de chauffage et de refroidissement des procédés et du bâtiment fonctionne pendant les périodes creuses. La demande électrique de pointe facturée par le fournisseur est de 470 kW. Pendant les périodes creuses, la charge s'est maintenue à 130 kW. La puissance appelée pendant les périodes moyennes et creuses fut enregistrée pour tout équipement apte à stocker de l'énergie. Les caractéristiques nominales ou la capacité de l'équipement furent également consignées.

Lorsqu'on a comparé les charges de l'équipement pendant les périodes creuses, on a pu identifier une possibilité de réduction de 170 kW de la puissance appelée. Si le tarif est de 6$ par kW, la prime totale peut être réduite de 1 020$ par mois.

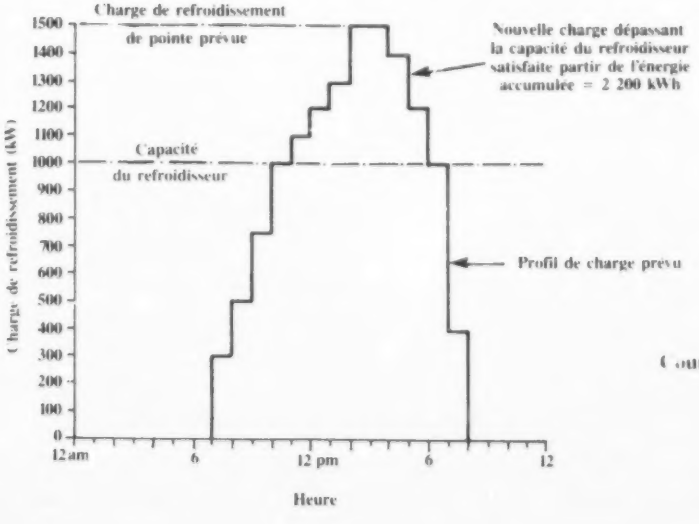
4. Agrandissement d'un bâtiment

Lorsqu'on ajoute des procédés ou agrandit un bâtiment, il est souvent nécessaire d'installer une nouvelle chaudière ou un nouveau refroidisseur. Un système de stockage d'énergie peut éliminer la nécessité d'ajouter ces appareils et permettre à l'équipement existant de fonctionner plus efficacement. En accumulant de l'énergie thermique pendant les périodes creuses, on peut satisfaire les demandes de chauffage ou de refroidissement. On peut satisfaire la charge additionnelle en distribuant de l'énergie accumulée. Le coût de l'équipement de stockage d'énergie peut être inférieur à celui d'une nouvelle chaudière ou d'un nouveau refroidisseur et les coûts énergétiques réduits à cause de la plus faible prime de puissance.

Dans l'exemple suivant, la feuille de travail 19-2 est utilisée pour évaluer les possibilités d'accumulation thermique et éviter l'achat d'un nouveau refroidisseur. Cette feuille peut également être utilisée pour évaluer la capacité thermique d'un système de chauffage à stocker de l'énergie.

L'agrandissement d'un bâtiment entraînera l'augmentation de la charge de refroidissement de pointe à 1 500 kW alors que la capacité du refroidisseur existant est de 1 000 kW. On pourrait satisfaire directement la nouvelle demande en augmentant de 500 kW la capacité frigorifique, ce qui entraînerait un investissement important et augmenterait les coûts d'exploitation.

Comme alternative, on pourrait installer un système de stockage d'énergie pour satisfaire la nouvelle demande. Le profil de charge quotidien prévu de l'installation est présenté à la colonne A de la feuille de travail 19-2 et tracé à la figure 26. La colonne C indique que le refroidisseur existant aura une surcharge de 11 à 18 heures. La colonne E indique qu'il y a un surplus de la capacité du refroidisseur entre 19 et 10 heures, surplus qui pourrait être utilisé pour charger un système d'accumulation.



Courbe de charge thermique pour l'exemple concret de rénovation 4
Figure 26

Le total de la colonne C montre que 2 200 kWh de réfrigération doivent être prélevés pour satisfaire la nouvelle charge. Le total de la colonne E donne la valeur de la charge de refroidissement pouvant être accumulée. Comme cette capacité de 13 050 kWh est supérieure à celle des 2 200 kWh requis, le refroidisseur existant pourra satisfaire toutes les demandes de la charge thermique et charger le système d'accumulation.

Pour obtenir 500 kW de refroidissement de plus, il faut un nouveau refroidisseur, des pompes, des démarreurs, du câblage, de la tuyauterie et des appareils de régulation. Le coût d'un système de stockage d'énergie avec ses réservoirs, ses pompes, sa tuyauterie, son câblage et ses régulateurs automatiques ainsi que le coût des changements de la structure du bâtiment pour recevoir les réservoirs, représente une dépense beaucoup moins grande.

La puissance appelée pour le refroidissement serait limitée à 285 kW si l'on utilisait le refroidisseur existant (1 000 kW divisés par un COP de 3,5), au lieu d'atteindre 430 kW (1 500 kW divisés par 3,5). Il s'agit d'une réduction de 145 kW de la puissance appelée.

Réduction de la prime de puissance

Feuille de travail 19-1

Entreprise: EXEMPLE No. 3 Date: JUIN '86

Endroit: RÉNOVATION Par: MBE

Charge électrique de pointe facturée par le fournisseur 470 kW (1)

Puissance moyenne appelée par l'entreprise — périodes creuses (charge de base) 130 kW (2)

La prime de puissance est optimisée lorsque la puissance demeure constante.

$$\frac{(1) + (2)}{2} = \frac{470 + 130}{2}$$

$$= 300 \text{ kW (3)}$$

Économies maximales de puissance possibles lorsque l'accumulation thermique est utilisée pour transférer des charges aux périodes creuses.

$$= 470 \text{ (1)} - 300 \text{ (3)}$$

$$= 170 \text{ kW (4)}$$

Systèmes suggérés pouvant stocker de l'énergie	Capacité équipment (kW)	Charge actuelle période de service (kW)	Charge actuelle période creuse (kW)	Possibilités d'accumulation thermique (kW)
Procédé électrique – Chauffage	200	200	50	150
Procédé électrique – refroidissement	100	80	20	80
Chauffage d'ambiance	50	0	25	0
Refroidissement d'ambiance	50	50	0	50
Chauffage d'eau chaude domestique	10	10	2	8
Autre	5	5	5	0
Totaux	415	345	102	288 (5)

Si (5) est supérieur à (4), on réalise des écomomies maximales de puissance.

Si (5) est inférieur à (4), les économies sont moins importantes.

On peut calculer les économies de puissance possibles comme suit:

Prime de puissance facturée $ 6 /kW/mois (6)

Réduction de puissance: valeur moindre de (4) ou (5) 170 kW (7)

Économies maximales possibles = $ 6 (6) x 170 (7)

= $ 1020 /mois

Notes:

1. Identifier les systèmes et l'équipement qui se prêtent le mieux à l'accumulation thermique.
2. S'assurer que la charge du système de stockage d'énergie ne produit pas une pointe de charge durant la période creuse.
3. Si l'on obtient des économies importantes, un spécialiste devrait effectuer une analyse en profondeur.

Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus

Feuille de travail 19-2

Page 1 de 2

Entreprise: EXEMPLE No. 4 Date: MARS '86

Endroit: RÉNOVATION Par: MBE

Étapes

(1) Prévoir la charge de chauffage ou de refroidissement horaire moyenne pour le jour de pointe de l'équipement en question. Il peut s'agir d'une chaudière, d'un refroidisseur ou d'un nouveau procédé. Inscrire ces valeurs dans la colonne A.

(2) Déterminer la capacité de l'équipement existant ou de l'écoulement perdu et comparer les valeurs avec A. Dans la colonne B, inscrire la valeur la plus basse de A ou la capacité de l'équipement.

(3) Soustraire B de A et inscrire le résultat dans la colonne C.

(4) La capacité du nouvel équipement à installer, sans accumulation thermique, est la plus grande valeur en C.

(5) Le total de C représente la quantité d'énergie accumulée utile requise pour éviter l'achat d'un nouvel équipement.

(6) Inscrire la valeur la plus grande de A ou la capacité de l'équipement dans la colonne D.

(7) Soustraire A de D et inscrire le résultat dans la colonne E.

(8) Le total de E représente la capacité d'accumulation thermique. Si le total de la colonne E est inférieur à celui de la colonne C, seule une partie de l'énergie nécessaire peut être régénérée à partir d'un système d'accumulation thermique et l'achat d'un nouvel équipement semble inévitable.

Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus

Feuille de travail 19-2

Page 2 de 2

Entreprise: EXEMPLE NO. 4 Date: MARS '86

Endroit: RÉNOVATION Par: MBE

HEURES	PROFIL DE CHARGE PRÉVU (kW) A	PLUS PETITE VALEUR DE A OU CAPACITÉ (kW) B	SURCHARGE A-B (kW) C	VALEUR LA PLUS ÉLEVÉE DE A OU CAPACITÉ (kW) D	CAPACITÉ EN SURPLUS D-A (kW) E
0-1 h	0	0	0	1000	1000
1-2 h	0	0	0	1000	1000
2-3 h	0	0	0	1000	1000
3-4 h	0	0	0	1000	1000
4-5 h	0	0	0	1000	1000
5-6 h	0	0	0	1000	1000
6-7 h	0	0	0	1000	1000
7-8 h	300	300	0	1000	700
8-9 h	500	500	0	1000	500
9-10 h	750	750	0	1000	250
10-11 h	1000	1000	0	1000	0
11-12 h	1100	1000	100	1100	0
12-13 h	1200	1000	200	1200	0
13-14 h	1300	1000	300	1300	0
14-15 h	1500	1000	500	1500	0
15-16 h	1500	1000	500	1500	0
16-17 h	1400	1000	400	1400	0
17-18 h	1200	1000	200	1200	0
18-19 h	1000	1000	0	1000	0
19-20 h	400	400	0	1000	600
20-21 h	0	0	0	1000	1000
21-22 h	0	0	0	1000	1000
22-23 h	0	0	0	1000	1000
23-24 h	0	0	0	1000	1000
		TOTAL	2200 kWh		13050 kWh

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes
D Feuilles de travail

GLOSSAIRE

Abaissement de température – Réglage de la température d'un thermostat à une valeur inférieure pendant les périodes d'inoccupation.

Air d'appoint – Air extérieur admis dans un bâtiment pour compenser l'air évacué ou extrait.

Analyse de diagnostic – Analyse d'une possibilité d'économie d'énergie pouvant comporter l'évaluation du fonctionnement du processus, l'étude des registres correspondants, le calcul des économies possibles et l'évaluation des frais d'immobilisation et des coûts d'exploitation afin de calculer la rentabilité.

Analyse au passage – Inspection visuelle de l'installation pour observer comment l'énergie est employée et déceler les cas où elle est gaspillée.

Anode sacrificielle – Électrode dont la décomposition lente protège d'autres équipements contre la corrosion.

Capacité d'accumulation – Quantité d'énergie thermique pouvant être stockée dans un système d'accumulation et exprimée en kWh ou MJ.

Chaleur excédentaire – Chaleur en surplus provenant des procédés, des occupants ou de l'éclairage.

Charge de base – Charge électrique ou thermique continuelle dont le niveau est presque toujours le même. Dans un système de refroidissement par exemple, la charge de base électrique pourrait comprendre des ventilateurs et des pompes fonctionnant continuellement: les refroidisseurs représenteraient les charges variables qui ne font habituellement pas partie de cette charge de base.

Charge de pointe – Charge thermique ou électrique la plus élevée d'une période donnée.

Dégradable – Susceptible d'être décomposé chimiquement et ainsi changer les propriétés physiques.

Degré-jour – Totalisation de la différence entre la température moyenne quotidienne d'un bulbe sec extérieur et la température de référence. Par exemple, dix degrés-jours de chauffage au-dessous de 18°C équivalent à un jour de 8°C ou dix jours de 17°C. Les degrés-jours peuvent être de «chauffage» ou de «refroidissement».

Eau d'appoint – Eau admise dans un système d'eau domestique ou de procédé pour compenser l'eau évaporée, vidangée et évacuée.

Énergie – Grandeur caractérisant l'aptitude d'un système à fournir un travail. L'énergie existe sous différentes formes transformables: énergie thermique (chaleur), mécanique (travail), électrique et chimique. L'énergie est mesurée en kilowatt-heures (kWh) ou en mégajoules (MJ).

Énergie gaspillée – Énergie dissipée sans avoir été pleinement utilisée. L'énergie gapillée peut être sous forme de vapeur, gaz d'échappement, pertes d'eau usée et même rebuts.

État – Solide, liquide ou gaz.

Période creuse – Période durant laquelle la puissance appelée ou la charge d'un appareil est inférieure à la charge de pointe. Les périodes creuses sont habituellement fonction d'un faible taux d'occupation.

Période de rentabilité – Période durant laquelle une dépense est rentabilisée par l'argent économisé annuellement.

Pertes de chaleur du milieu thermique en réserve – Énergie perdue par le milieu thermique par la transmission de chaleur à travers les parois des réservoirs et du réseau de tuyauteries.

Rendement saisonnier de la chaudière – Débit calorifique total à la sortie, divisé par le débit calorifique total à l'entrée pendant une saison de chauffage complète.

Stratification – Formation de couches de température différente dans les masses d'air ou de liquide à mouvement lent, entraînée par la différence de densité entre les fluides chauds et froids. La poussée d'Archimède entraîne l'air ou le liquide chaud moins dense à monter vers la partie supérieure d'une pièce ou d'un contenant. L'air ou le liquide froid demeure dans la partie inférieure. L'interface entre les fluides de température différente est appelée thermocline.

Système de stockage d'énergie – Réservoir, récipient, enceinte, trémie ou contenant intégrant des pompes et des appareils de régulation pour stocker de l'énergie thermique.

Température moyenne – Moyenne des températures minimale et maximale.

CHALEUR SPÉCIFIQUE ET MASSE VOLUMIQUE TYPES DE CERTAINS MATÉRIAUX
TABLE 1

Matériau	Chaleur spécifique [kJ/(kg·°C)]	Masse volumique (kg/m^3)
Brique	0,80	1920
Béton	0,65	2300
Tuile d'argile	0,92	1000
Blocs en béton	0,92	—
Pierre à chaux	0,91	1650
Glace (à 0°C)	2,04	921*
Eau (à 20°C)	4,1855	998
Bois dur	1,63	550
Bois mou	1,63	430
Placoplâtre	1,09	2110
Parafine	2,90	900

*La glace à 0°C est moins dense que l'eau; pour les calculs du présent module, utiliser une valeur de 1000 kg/m^3.

CARACTÉRISTIQUES DES MILIEUX THERMIQUES
TABLE 2

	Volume Requis (L/MJ)	Température (°C)	Installation	Possibilité de perte d'énergie	Durée de vie du matériau
LIQUIDES					
Eau glacée	30	5 à 10	Grande	Problème de mélange	Permanente
Eau chaude	30	38 à 90	Grande	Certain mélange	Permanente
CHANGEMENT DE PHASE					
Glace solide	3.0	−5 à +10	Sectionnée	Aucune	Permanente
Glace en flocons	3.0	−5 à +10	Grande	Aucune	Permanente
Sel de Glauber	2.3	Point de congélation 32	Sectionnée	Aucune	Limitée
Chlorure de calcium hexahydrate	3.4	Point de congélation 29	Sectionnée	Aucune	Illimitée
Sel de magnésium eutectique	4.9	Point de congélation 58	Sectionnée	Aucune	Illimitée
Nitrate de magnésium hexahydrate	4.0	Point de congélation 89	Sectionnée	Aucune	Illimitée
SOLIDES					
Pierres	76	—	Grande	Aucune	Permanente
Sable	100	—	Sectionnée	Aucune	Permanente

CONVERSIONS COURANTES

1 baril (35 gal imp.) (42 gal U.S.)	= 159,1 litres	1 kilowatt-heure	= 3600 kilojoules
1 gallon (imp.)	= 1,20094 gallon (U.S.)	1 Newton	= 1 Kg-m/s^2
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts	1 thermie	= 10^5 Btu
1 cheval vapeur	= 2545 Btu/heure	1 tonne (réfrigérant)	= 12002,84 Btu/heure
1 cheval vapeur	= 0,746 kilowatts	1 tonne (réfrigérant)	= 3516,8 watts
1 joule	= 1 N-m	1 watt	= 1 joule/seconde
Kelvin	= (°C + 273,15)	degré Rankine	= (°F + 459,67)

Cubes

1 v^3 = 27 pi^3

1 pi^3 = 1728 po^3

1 cm^3 = 1000 mm^3

1 m^3 = 10^6 cm^3

1 m^3 = 1000 L

Carrés

1 v^2 = 9 pi^2

1 pi^2 = 144 po^2

1 cm^2 = 100 mm^2

1 m^2 = 10000 cm^2

PRÉFIXES SI

Préfixe	Symbole	Valeur numérique	Exposant
téra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
méga	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hecto	h	100	10^2
déca	da	10	10^1
déci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	u	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	10^{-12}

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm^2	ampère/pouce carré	A/po^2	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm^3	pouce cube	po^3	0,06102
mètre cube	m^3	pied cube	pi^3	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pied cube	lb/pi^3	0,06243
joule	J	Btu	Btu	$9,480 \times 10^{-4}$
joule	J	pied-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	$3,73 \times 10^{-7}$
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	$9,842 \times 10^{-4}$
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	$1,102 \times 10^{-3}$
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	$9,87 \times 10^{-3}$
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po^2	0,1450
kilowatt	kW	pied-livre/seconde	pi-lb/s	737,6
kilowatt	kW	cheval vapeur	cv	1,341
kilowatt-heure	kWh	Btu	Btu	3413
litre	L	pied cube	pi^3	0,03531
litre	L	gallon (imp.)	gal (imp.)	0,21998
litre	L	gallon (U.S.)	gal (U.S.)	0,2642
litre/seconde	L/s	pied cube/minute	pi^3/min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m^2	lumen par pied carré	lm/pi^2	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	pied bougie	pi-b	0,09290
mètre	m	pied	pi	3,281
mètre	m	verge	yd	1,09361
partie par million	ppm	grain/gallon (imp.)	gr/gal (imp.)	0,07
partie par million	ppm	grain/gallon (U.S.)	gr/gal (U.S.)	0,05842
perméance (métrique)	PERM	perméance (imp.)	perm	0,01748
centimètre carré	cm^2	pouce carré	po^2	0,1550
mètre carré	m^2	pied carré	pi^2	10,764
mètre carré	m^2	verge carré	v^2	1,196
tonne (métrique)	t	livre	lb	2204,6
watt	W	Btu/heure	Btu/h	3,413
watt	W	lumen	lm	668,45

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po^2	A/po^2	ampère/cm^2	A/cm^2	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	$2,928 \times 10^{-4}$
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pied cube	pi^3	mètre cube	m^3	0,02832
pied cube	pi^3	litre	L	28,32
pied cube/minute	pi^3/m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F−32)/1,8
pied	pi	mètre	m	0,3048
pied bougie	pi-b	lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	10,764
pied lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,42626
pied-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pied-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pied livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	$1,356 \times 10^{-3}$
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	$2,684 \times 10^6$
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	kilopascal	kPa	0,2491

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES (CONT.)

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
lambert	L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,183
lumen/pied carré	lm/pi^2	lumen/mètre carré	lm/m^2	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mille	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,721 \times 10^{-11}$
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,745 \times 10^{-11}$
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4532 \times 10^{-12}$
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4593 \times 10^{-12}$
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	$4,536 \times 10^{-4}$
livre/pied cube	lb/pi^3	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po^2	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi^2	mètre carré	m^2	0,09290
pouce carré	po^2	centimètre carré	cm^2	6,452
verge carré	v^2	mètre carré	m^2	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

* "L" tel qu'utilisé dans l'éclairement.

Les valeurs typiques qui suivent peuvent servir de facteurs de conversion quand les données réelles manquent. Les équivalents en MJ et en BTU correspondent à la chaleur de combustion. Les chiffres applicables aux hydrocarbures correspondent à la valeur calorifique la plus élevée (poids humide). Certains produits sont de toute évidence des matières premières, mais ont été inclus au tableau pour le rendre plus complet et pour servir de référence. Les facteurs de conversion pour le charbon sont approximatifs puisque la valeur calorifique de ce produit varie selon la mine d'où il a été extrait.

TYPE D'ÉNERGIE	MÉTRIQUE	IMPÉRIAL
CHARBON		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	25,0 × 10^6 BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	25,8 × 10^6 BTU/tonne
— bitumineux	32 100 mégajoules/tonne	27,6 × 10^6 BTU/tonne
— sous-bitumineux	22 100 mégajoules/tonne	19,0 × 10^6 BTU/tonne
— lignite	16 700 mégajoules/tonne	14,4 × 10^6 BTU/tonne
COKE		
— métallurgique	30 200 mégajoules/tonne	26,0 × 10^6 BTU/tonne
— pétrolier		
— brut	23 300 mégajoules/tonne	20,0 × 10^6 BTU/tonne
— calciné	32 600 mégajoules/tonne	28,0 × 10^6 BTU/tonne
POIX	37 200 mégajoules/tonne	32,0 × 10^6 BTU/tonne
PÉTROLE BRUT	38,5 mégajoules/litre	5,8 × 10^6 BTU/baril
MAZOUT N° 2	38,68 mégajoules/litre	5,88 × 10^6 BTU/baril 0,168 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 4	40,1 mégajoules/litre	6,04 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)		
— 2,5 % soufre	42,3 mégajoules/litre	6,38 × 10^6 BTU/baril 0,182 × 10^6 BTU/GI
— 1,0 % soufre	40,5 mégajoules/litre	6,11 × 10^6 BTU/baril 0,174 × 10^6 BTU/GI
— 0,5 % soufre	40,2 mégajoules/litre	6,05 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
KÉROSÈNE	37,68 mégajoules/litre	0,167 × 10^6 BTU/GI
DIESEL	38,68 mégajoules/litre	0,172 × 10^6 BTU/GI
GAZOLINE	36,2 mégajoules/litre	0,156 × 10^6 BTU/GI
GAZ NATUREL	37,2 mégajoules/m^3	1,00 × 10^6 BTU/M pi^3
PROPANE	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	0,02165 × 10^6 BTU/lb 0,1145 × 10^6 BTU/GI
ÉLECTRICITÉ	3,6 mégajoules/kWh	0,003413 × 10^6 BTU/kWh

Réduction de la prime de puissance

Feuille de travail 19-1

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Charge électrique de pointe facturée par le fournisseur _____ kW (1)

Puissance moyenne appelée par l'entreprise — périodes creuses (charge de base) _____ kW (2)

La prime de puissance est optimisée lorsque la puissance demeure constante.

$$\frac{(1) + (2)}{2} = \frac{_____ + _____}{2}$$

= _____ kW (3)

Économies maximales de puissance possibles lorsque l'accumulation thermique est utilisée pour transférer des charges aux périodes creuses.

= _____ (1) − _____ (3)

= _____ kW (4)

Systèmes suggérés pouvant stocker de l'énergie	Capacité équipment (kW)	Charge actuelle période de service (kW)	Charge actuelle période creuse (kW)	Possibilités d'accumulation thermique (kW)
Procédé électrique − Chauffage				
Procédé électrique − refroidissement				
Chauffage d'ambiance				
Refroidissement d'ambiance				
Chauffage d'eau chaude domestique				
Autre				
Totaux	_____	_____	_____	_____ (5)

Si (5) est supérieur à (4), on réalise des écomomies maximales de puissance.

Si (5) est inférieur à (4), les économies sont moins importantes.

On peut calculer les économies de puissance possibles comme suit:

Prime de puissance facturée $_____/kW/mois (6)

Réduction de puissance: valeur moindre de (4) ou (5) _____ kW (7)

Économies maximales possibles = $ _____ (6) x _____ (7)

= $ _____/mois

Notes:

1. Identifier les systèmes et l'équipement qui se prêtent le mieux à l'accumulation thermique.
2. S'assurer que la charge du système de stockage d'énergie ne produit pas une pointe de charge durant la période creuse.
3. Si l'on obtient des économies importantes, un spécialiste devrait effectuer une analyse en profondeur.

Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus

Feuille de travail 19-2
Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Étapes

(1) Prévoir la charge de chauffage ou de refroidissement horaire moyenne pour le jour de pointe de l'équipement en question. Il peut s'agir d'une chaudière, d'un refroidisseur ou d'un nouveau procédé. Inscrire ces valeurs dans la colonne A.

(2) Déterminer la capacité de l'équipement existant ou de l'écoulement perdu et comparer les valeurs avec A. Dans la colonne B, inscrire la valeur la plus basse de A ou la capacité de l'équipement.

(3) Soustraire B de A et inscrire le résultat dans la colonne C.

(4) La capacité du nouvel équipement à installer, sans accumulation thermique, est la plus grande valeur en C.

(5) Le total de C représente la quantité d'énergie accumulée utile requise pour éviter l'achat d'un nouvel équipement.

(6) Inscrire la valeur la plus grande de A ou la capacité de l'équipement dans la colonne D.

(7) Soustraire A de D et inscrire le résultat dans la colonne E.

(8) Le total de E représente la capacité d'accumulation thermique. Si le total de la colonne E est inférieur à celui de la colonne C, seule une partie de l'énergie nécessaire peut être régénérée à partir d'un système d'accumulation thermique et l'achat d'un nouvel équipement semble inévitable.

Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus

Feuille de travail 19-2

Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

HEURES	PROFIL DE CHARGE PRÉVU (kW) A	PLUS PETITE VALEUR DE A OU CAPACITÉ (kW) B	SURCHARGE A-B (kW) C	VALEUR LA PLUS ÉLEVÉE DE A OU CAPACITÉ (kW) D	CAPACITÉ EN SURPLUS D-A (kW) E
0-1 h					
1-2 h					
2-3 h					
3-4 h					
4-5 h					
5-6 h					
6-7 h					
7-8 h					
8-9 h					
9-10 h					
10-11 h					
11-12 h					
12-13 h					
13-14 h					
14-15 h					
15-16 h					
16-17 h					
17-18 h					
18-19 h					
19-20 h					
20-21 h					
21-22 h					
22-23 h					
23-24 h					
			_____		_____
		TOTAL	_____ kWh		_____ kWh